

LHCでのSUSY研究

—超対称性粒子探索の現状と将来—

0. パラメータと言葉の整理
1. LHC実験でのSUSY粒子の生成と崩壊
2. 発見能力(取らぬ狸の皮算用)
3. 実際の研究課題(検出器理解も)
4. 現在の制限(主にLEP実験の結果)
5. まとめ

2005年3月11日 あさい

SUSYの破れ（2種類）とDMの候補（3種類）

通常の粒子		超対称性粒子	
S=1/2	charged lepton: e, μ , τ neutrino: ν , ν , ν quark: u, d, c, s, t, b	S=0	charged scalar lepton: \tilde{e} , $\tilde{\mu}$, $\tilde{\tau}$ scalar neutrino: $\tilde{\nu}$, $\tilde{\nu}$, $\tilde{\nu}$ scalar quark: \tilde{u} , \tilde{d} , \tilde{c} , \tilde{s} , \tilde{t} , \tilde{b}
S=1	photon: γ (B^0 and W^0) Weak Boson: W^+ , Z gluon: g	S=1/2	Bino: \tilde{B}^0 Wino: \tilde{W}^+ , \tilde{W}^0 gluino: \tilde{g}
S=0	Higgs: h, H, A, H^{\pm}	S=1/2	Higgsino: \tilde{H}^0 , \tilde{H}^0_2 , \tilde{H}^{\pm}
S=2	Graviton: G	S=3/2	gravitino: \tilde{G}
S=0	Axion: a	S=1/2	Axino: \tilde{a}

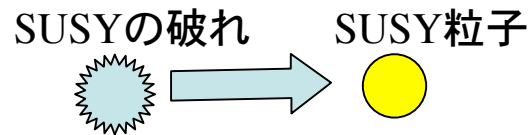
あとは、げてもの？
(モノポール、格子欠陥
ミラーワールド。。。)

1. Neutralino

4つの状態は混合する。
そのうち一番軽い状態は
安定で良いDMの候補
質量: $O(10)$ - $O(100)$ GeV
非相対論的な Cold DM

PQ

2. Gravitino

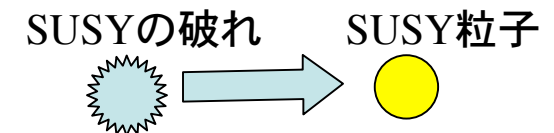


3. Axion/Axino

$10^{-5} \sim 10^{-6}$ eV (Cold DM)
KeV-GeV (Warm-Cold)

ゲージ相互作用を通して伝わる場合：
 \tilde{G} が軽いまま(<1GeV Warm DM)
(Gauge mediation)

宇宙論的にはあまり面白くない。
(warm, slow decay BBNにおいたする)



重力を介して、伝わる場合：
 \tilde{G} が重くなる。
(Gravity mediation)

0. SUSYの破れ(model parameterの整理 よく使われる略語の整理)

一般にパラメータはC P位相も入れて約120以上ある。 ”もっともらしい仮定”を入れて、自由度を減らす。

S=0	charged scalar lepton: $\tilde{e}, \tilde{\mu}, \tilde{\tau}$ scalar neutrino: $\tilde{\nu}, \tilde{\nu}, \tilde{\nu}$ scalar quark: $\tilde{u}, \tilde{d}, \tilde{c}, \tilde{s}, \tilde{t}, \tilde{b}$
S=1/2	Bino: \tilde{B}^0 (M_1) Wino: $\tilde{W}^{+}, \tilde{W}^0$ (M_2) gluino: \tilde{g} (M_3)
S=1/2	Higgsino: $\tilde{H}_1^0, \tilde{H}_2^0, \tilde{H}^{\pm}$ (μ)
S=3/2	gravitino: \tilde{G}

Model依存度

(1) ★★★ 4.5個のパラメータ(mSugra) : P. 3、4
 $m_0, m_{1/2}, \tan \beta, A_0, \text{sign}(\mu)$
 (mass @GUT) (VEV) (scalar 3点) (Higgsino mass)

GUT scale($2 \times 10^{16} \text{GeV}$)で、共通の質量、3点結合
 ヒッグスセクターもsfermion, gauginoと同じ

- ⚡ 1. $M_1 : M_2 : M_3 = \alpha_1 : \alpha_2 : \alpha_3 = 0.4 m_{1/2} : 0.8 m_{1/2} : 2.8 m_{1/2}$ (GUT)
- 2. Higgsino mass ($|\mu| > 0.8 m_{1/2}$ (Wino) ($m_0 \gg m_{1/2}$ の場合以外) (2)/P.6で

$$\tilde{\chi}_1^0 \approx \tilde{B}^0, \tilde{\chi}_2^0 \approx \tilde{W}^0, \tilde{\chi}_1^{\pm} \approx \tilde{W}^{\pm}, \tilde{\chi}_{3,4}^0, \tilde{\chi}_2^{\pm} \approx \tilde{H}$$

→ LHCでの研究では標準的(でも、もう後がないところまできている? → P. 5 図)

(2) ★★★ 5個のパラメータ(CMSSM) :

μ も完全にfreeにする。(GUTのモデルによるが、Higgs, Higgsinoは別のmultipletに入っている。同じと言うのはやりすぎ) → Higgsino-likeな $\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_1^{\pm}$, が可能 → 次の図 P. 6

SU(5) 5次元表現 eL dR 10次元表現 uL dL uR eR 5+5(bar)表現 Higgs) 2

4.5個のパラメター(**mSugra**) :

m_0 , $m_{1/2}$, $\tan\beta$, A_0 , $\text{sign}(\mu)$
 (mass @GUT) (VEV) (scalar 3点) (Higgsino mass)

S=0	charged scalar lepton: $\tilde{e}, \tilde{\mu}, \tilde{\tau}$ scalar neutrino: $\tilde{\nu}, \tilde{\nu}, \tilde{\nu}$ scalar quark: $\tilde{u}, \tilde{d}, \tilde{c}, \tilde{s}, \tilde{t}, \tilde{b}$
S=1/2	Bino: \tilde{B}^0 (M_1) Wino: $\tilde{W}^{+}, \tilde{W}^0$ (M_2) gluino: \tilde{g} (M_3)
S=1/2	Higgsino: $\tilde{H}_1^0, \tilde{H}_2^0, \tilde{H}^{\pm}$ (μ)
S=3/2	gravitino: \tilde{G}

GUT scale(2×10^{16} GeV)で、共通の質量、3点結合
 ヒッグスセクターもsfermion, gauginoと同じ

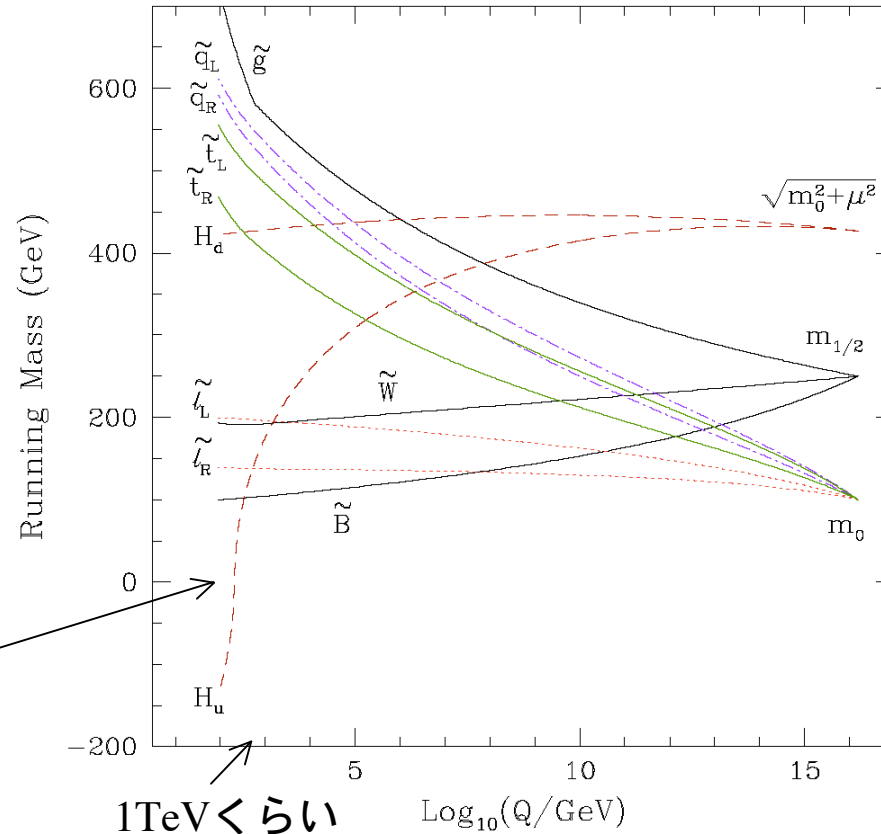
$$M_1 : M_2 : M_3 =$$

$$\alpha_1 : \alpha_2 : \alpha_3 =$$

$$0.4 m_{1/2} : 0.8 m_{1/2} : 2.8 m_{1/2}$$

@Mz

自然にマイナスになる。
 これが自発的対称性の破れ
 ヒッグス機構



GUTの
 スケール

その他の粒子の性質

Mass@EW

共通@GUT

Running effect
結合が強い程太る

$$m^2(\tilde{g}) = (2.8m_{1/2})^2$$

$$m^2(\tilde{u}_L) = m_0^2 + 6.28m_{1/2}^2 + 0.35D$$

$$m^2(\tilde{u}_R) = m_0^2 + 5.87m_{1/2}^2 + 0.16D$$

$$m^2(\tilde{d}_L) = m_0^2 + 6.28m_{1/2}^2 - 0.42D$$

$$m^2(\tilde{d}_R) = m_0^2 + 5.82m_{1/2}^2 - 0.08D$$

$$m^2(\tilde{e}_L) = m_0^2 + 0.52m_{1/2}^2 - 0.27D$$

$$m^2(\tilde{e}_R) = m_0^2 + 0.15m_{1/2}^2 - 0.23D$$

$$m^2(\tilde{\nu}_L) = m_0^2 + 0.52m_{1/2}^2 + 0.50D$$

$(D = M_Z^2 \cos 2\beta < 0(\text{Higgs}))$

LとR : SU(2)に対する電荷を持っているか否かでfermionも2つに分類される。

それ以外の量子数は同じ。

SU(3) : 強い力 一番太る

SU(2) : 少し太る L > R

• Coloured particles (\tilde{g}, \tilde{q}) は重い

• この関係式は(1),(2)に共通
(3)に対しては、 $m_{1/2}$ の係数が
予言出来なくなる

• 第3世代の \tilde{f} は軽い。
(Yukawa+LR mixingの効果)
DMとの関係では τ が大切

$$m^2(\tilde{\tau}) = \begin{bmatrix} m_0^2 + 0.52m_{1/2}^2 + m_\tau^2 - 0.27D & -m_\tau(A_\tau + \mu \tan\beta) \\ -m_\tau(A_\tau + \mu \tan\beta) & m_0^2 + 0.15m_{1/2}^2 + m_\tau^2 - 0.23D \end{bmatrix}$$

$\tan\beta$ が大きいと、 τ が大切

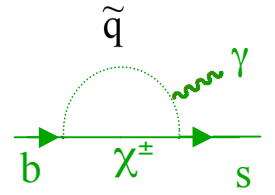
mSugra killer ?

WMAPの結果について

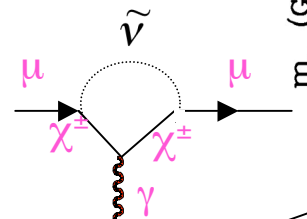
$$\Omega_{CDM} h^2 = 0.113^{+0.016}_{-0.018}$$

Ωをこの程度の小さきにするは、 $\tilde{\chi}_1^0$ と $\tilde{\tau}_1^\pm$ が縮退していてこのCo annihilationが効くようなところでないといけない。かなり制限されてしまう。(あと、 $M_A=2m(\tilde{\chi}_1^0)$ の時や μ が $m_0, m_{1/2}$ と比べてかなり小さい場合も許される)

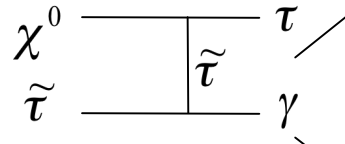
→ SUSY見えたら mSugraとの無矛盾か否かのチェックは極めて重要。★★★★



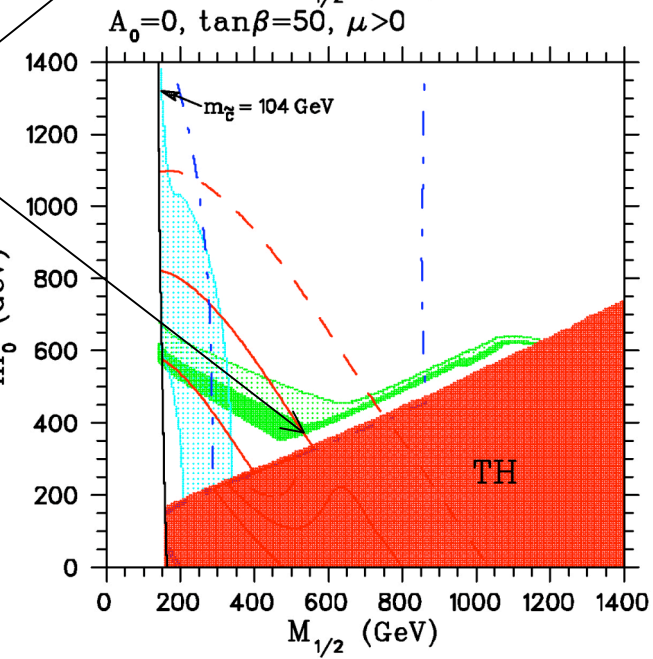
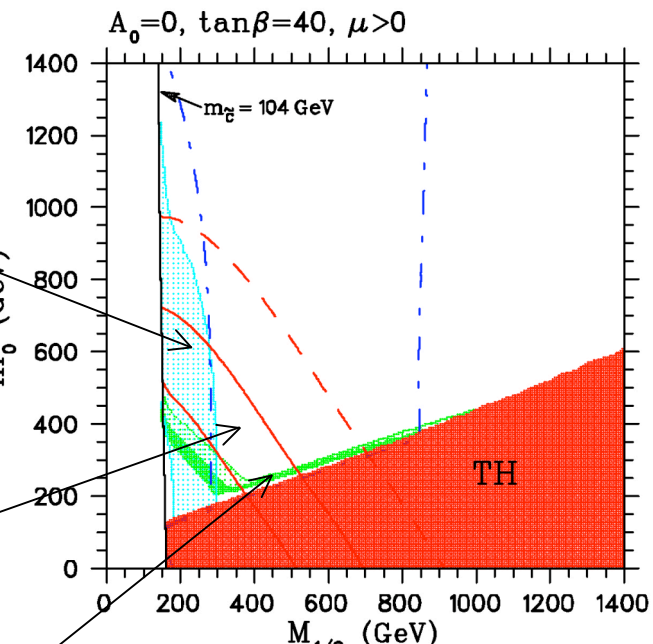
がないので駄目



が見えた？



Co-annihilationでちょうど良い Ω_{CDM}




μ と Chargino/ Neutralino

S=1/2	Bino: \tilde{B}^0 Wino: \tilde{W}^+ , \tilde{W}^0	m_1 m_2
S=1/2	Higgsino: \tilde{H}_1^0 , \tilde{H}_2^0 , \tilde{H}^\pm	μ

同じ量子数を持っている状態は混合し、
質量のeigenstateを作る。
これが、
Chargino (charged wino + charged higgsino)
Neutralino (bino, neutral wino + neutral higgsino)

$$\begin{bmatrix}
 M_1 & 0 & -M_Z \sin\theta_W \cos\beta & M_Z \sin\theta_W \sin\beta \\
 0 & M_2 & M_Z \cos\theta_W \cos\beta & -M_Z \cos\theta_W \sin\beta \\
 -M_Z \sin\theta_W \cos\beta & M_Z \cos\theta_W \cos\beta & 0 & -\mu \\
 M_Z \sin\theta_W \sin\beta & -M_Z \cos\theta_W \sin\beta & -\mu & 0
 \end{bmatrix}
 \begin{pmatrix}
 \tilde{B}^0 \\
 \tilde{W}^0 \\
 \tilde{H}_1^0 \\
 \tilde{H}_2^0
 \end{pmatrix}$$


 Mass eigenstate

$$\begin{pmatrix}
 \tilde{\chi}_1^0 \\
 \tilde{\chi}_2^0 \\
 \tilde{\chi}_3^0 \\
 \tilde{\chi}_4^0
 \end{pmatrix}$$

1. $\tilde{\chi}_1^0$ が LSP (Lightest stable particle) \rightarrow DM
2. M_1, M_2, μ, M_Z の大小関係が大切。 M_Z が小さいとすれば、LSP は、Bino-like (M_1 が小)、Wino-like (M_2 が小)、higgsino-like (μ が小)。

chargino/neutralino の性質はこれらの大小関係が鍵となる。
(GUT $M_1:M_2$ higgsino mass) どうかわるは?
Decay の所で

Chargino も M_2, μ の混合状態で Wino-like と higgsino-like

SUSYの破れ(2)

一般にパラメータはC P位相も入れて約120以上ある。”もっともらしい仮定”を入れて、自由度を減らす。

S=0	charged scalar lepton: $\tilde{e}, \tilde{\mu}, \tilde{\tau}$ scalar neutrino: $\tilde{\nu}, \tilde{\nu}, \tilde{\nu}$ scalar quark: $\tilde{u}, \tilde{d}, \tilde{c}, \tilde{s}, \tilde{t}, \tilde{b}$
S=1/2	Bino: \tilde{B}^0 (M_1) Wino: $\tilde{W}^{+}, \tilde{W}^0$ (M_2) gluino: \tilde{g} (M_3)
S=1/2	Higgsino: $\tilde{H}_1^0, \tilde{H}_2^0, \tilde{H}^{+-}$ (μ)
S=3/2	gravitino: \tilde{G}

(3) ★ MSSM

(この言葉は、人によって全然定義が違います。)

$M_1, M_2, M_3, \mu, \tan\beta$ (5個 NaiveなGUTでない)
 $M_{slep_L}, M_{slep_R}, M_{squ_L}, M_{squ_R}$ (4個 縮退)
 第3世代 $3(t, b, \tau) * 2(L, R) - 1(\text{top mass})$ (5個)
 A, A_t, A_b, A_τ (4個)

18個程度のパラメータ

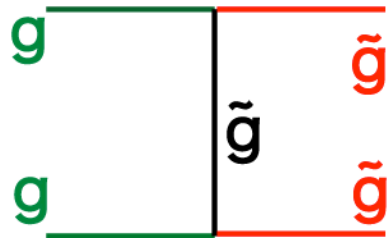
第1, 2世代は縮退しているFCNCの制限
 LSPはneutralino_1 などの制限

R-parityの破れたモデルの研究もあるけど、今は仮定する。

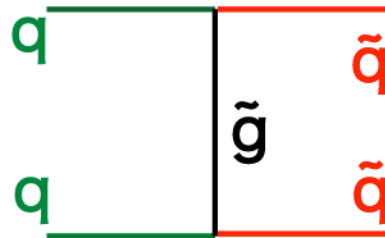
1-1 LHCでのSUSY粒子の生成過程

陽子は、クォークとグルオンで構成されている。クォークとグルオンから生成されるので $(\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g}\tilde{q}, \tilde{q}\tilde{q})$ が、主要な生成過程である。

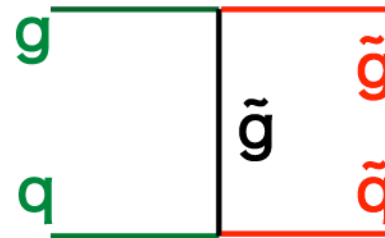
$\tilde{g}\tilde{g}$ 対生成



$\tilde{q}\tilde{q}$ 対生成



$\tilde{q}\tilde{g}$ 随伴生成



色を持った
粒子を生成
LEPとは相
補的な関係

・大きな生成断面積
・ただの強い相互作用:

mass以外は SUSY parameter
に強く依存しない。

モデル依存度は、

★ 程度

S=0	charged scalar lepton: $\tilde{e}, \tilde{\mu}, \tilde{\tau}$ scalar neutrino: $\tilde{\nu}_e, \tilde{\nu}_\mu, \tilde{\nu}_\tau$ scalar quark: $\tilde{u}, \tilde{d}, \tilde{c}, \tilde{s}, \tilde{t}, \tilde{b}$
S=1/2	Bino: \tilde{B}^0 (M_1) Wino: \tilde{W}^+, \tilde{W}^0 (M_2) gluino: \tilde{g} (M_3)
S=1/2	Higgsino: $\tilde{H}^0_1, \tilde{H}^0_2, \tilde{H}^{\pm}$ (μ)
S=3/2	gravitino: \tilde{G} 8

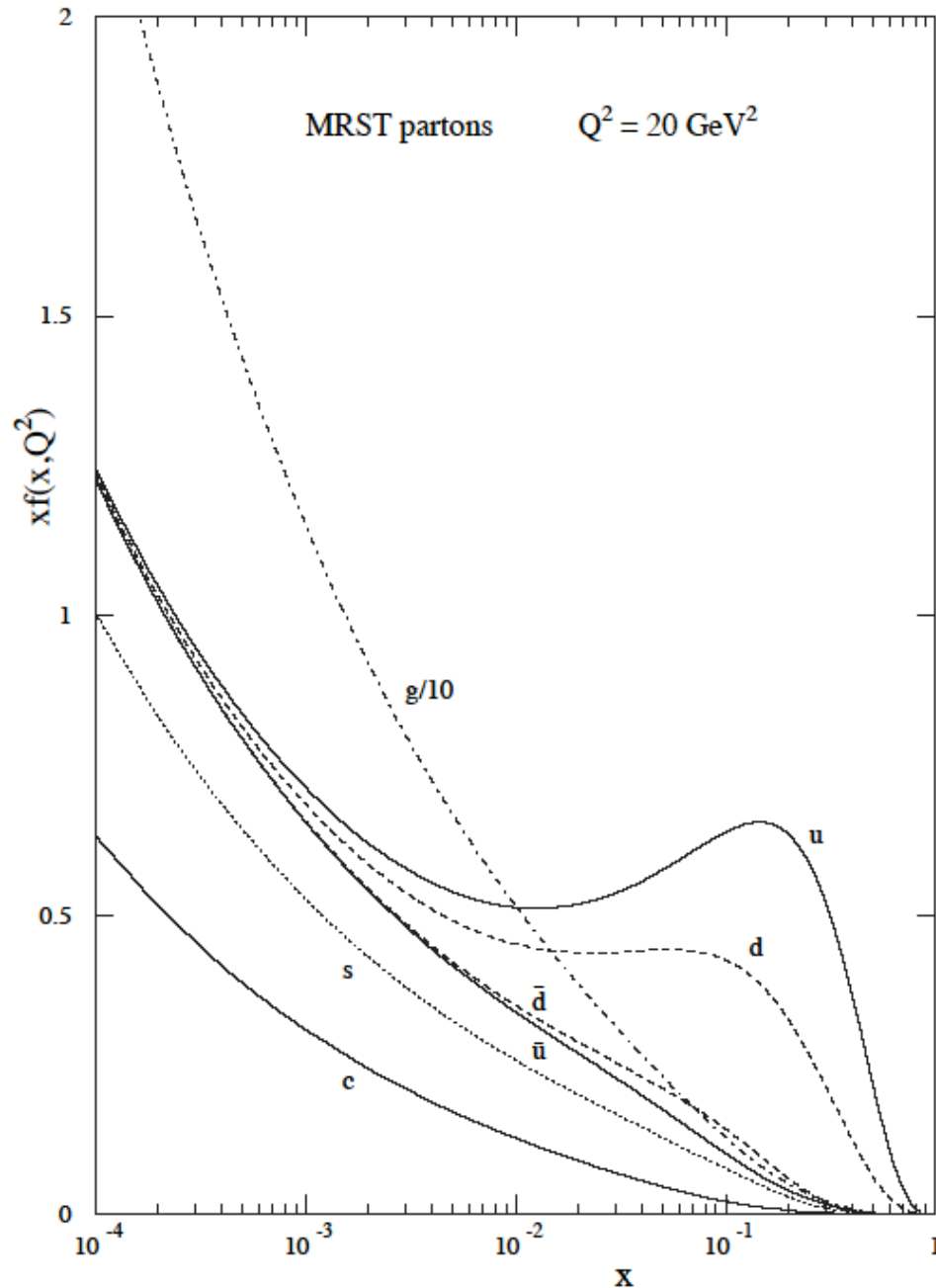


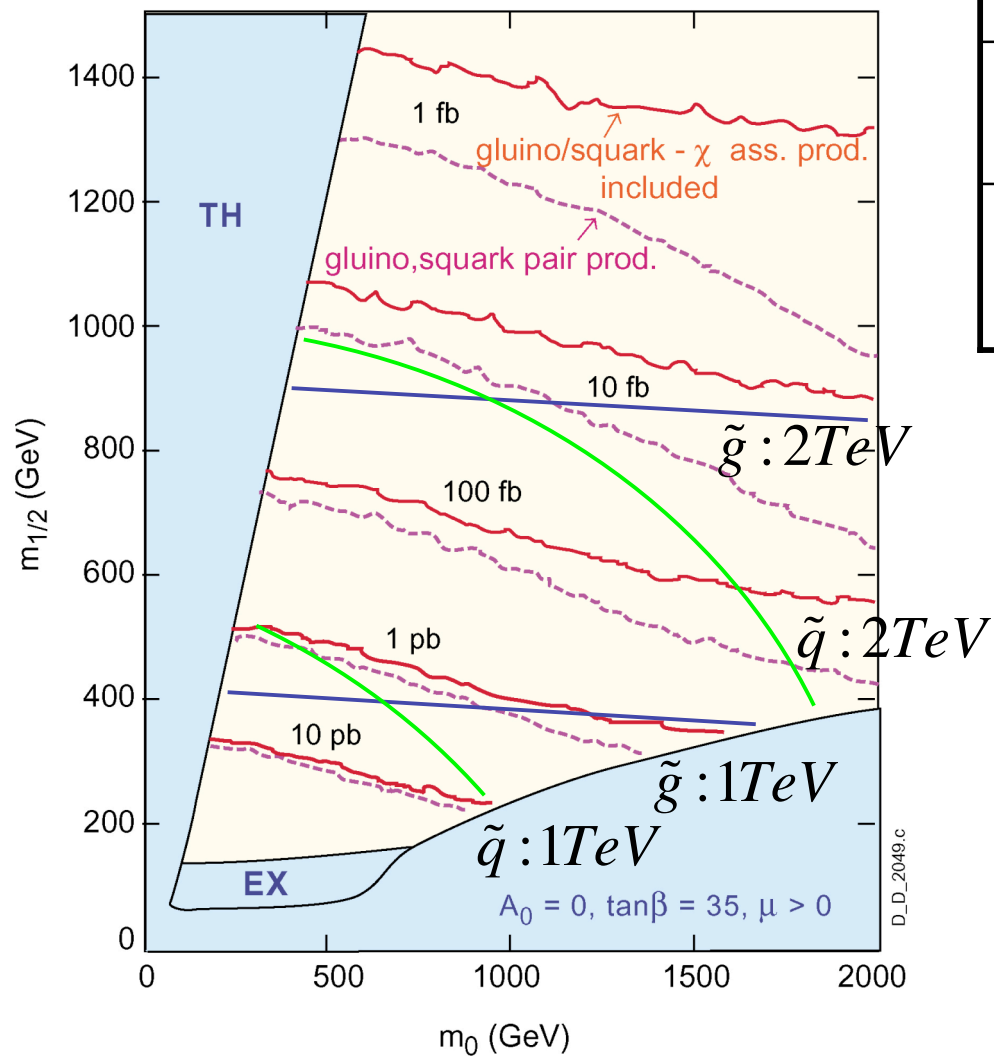
Fig. 3. MRST partons at $Q^2 = 20 \text{ GeV}^2$

$$\sqrt{s} = \sqrt{x_1 x_2} * 14 \text{ TeV}$$

1,2 TeVの重いSUSY粒子を作る \rightarrow high $x > 0.2$
 LHCは、g,u,dコライダー
 軽いとき gluonが主で σ が飛躍的に大きくなる。

非常に重いとき u,dが主 gluinoは直接出来ない。

$(\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g}\tilde{q}, \tilde{q}\tilde{q})$ 生成断面積 at LHC



$m(\tilde{q}) = m(\tilde{g}) = 0.5\text{TeV}$	$\sigma \sim 100\text{pb}$ $\tilde{g}\tilde{g}$ がmain
$m(\tilde{q}) = m(\tilde{g}) = 1\text{TeV}$	$\sigma \sim 3\text{pb}$
$m(\tilde{q}) = m(\tilde{g}) = 2\text{TeV}$	$\sigma \sim 20\text{fb}$ $\tilde{u}\tilde{u}, \tilde{u}\tilde{d}$ がmain

Lが初めての1年で10fb⁻¹なので、
3 * 10³ * 10 = 3万個 (1TeV)

虎の巻き @ M z

$$m^2(\tilde{g}) = (2.8m_{1/2})^2$$

$$m^2(\tilde{u}_L) = m_0^2 + 6.28m_{1/2}^2 + 0.35D$$


$$m^2(\tilde{u}_R) = m_0^2 + 5.87m_{1/2}^2 + 0.16D$$

$$m^2(\tilde{d}_L) = m_0^2 + 6.28m_{1/2}^2 - 0.42D$$

$$m^2(\tilde{d}_R) = m_0^2 + 5.82m_{1/2}^2 - 0.08D$$

モデル ★★ 程度 Mass -> m0, m1/2 端は3☆

\tilde{g}, \tilde{q} のdecay table

モデル依存度 

	$m(\tilde{g}) < m(\tilde{q})$	$m(\tilde{g}) \approx m(\tilde{q})$	$m(\tilde{g}) > m(\tilde{q})$
\tilde{g}	$q\bar{q}\tilde{B}^0 (\approx 1)$ $\tilde{g} \rightarrow q\bar{q}\tilde{W}^0 (\approx 2)$ $q\bar{q}\tilde{W}^\pm (\approx 4)$	$\tilde{g} \rightarrow t\tilde{t}_1$ $\tilde{g} \rightarrow b\tilde{b}_1$	$\tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}$
\tilde{q}_L	$\tilde{q}_L \rightarrow q\tilde{g}$	$\tilde{q}_L \rightarrow q\tilde{W}^0 (\approx 1)$ $\tilde{q}_L \rightarrow q\tilde{W}^\pm (\approx 2)$	
\tilde{q}_R	$\tilde{q}_R \rightarrow q\tilde{g}$	$\tilde{q}_R \rightarrow q\tilde{B}^0$	

ダイアグラム: Higgsino成分が登場しない(第3世代は例外 あとで) 11

依存度 ★★

\tilde{g}, \tilde{q} のdecay table (ダイアグラム)

	$m(\tilde{g}) < m(\tilde{q})$	$m(\tilde{g}) \approx m(\tilde{q})$	$m(\tilde{g}) > m(\tilde{q})$
\tilde{g}	$q\bar{q}\tilde{B}^0 (\approx 1)$ $\tilde{g} \rightarrow q\bar{q}\tilde{W}^0 (\approx 2)$ $q\bar{q}\tilde{W}^\pm (\approx 4)$	$\tilde{g} \rightarrow t\bar{t}_1$ $\tilde{g} \rightarrow b\bar{b}_1$	$\tilde{g} \rightarrow q\bar{q}$
\tilde{q}_L	$\tilde{q}_L \rightarrow q\tilde{g}$		$q\tilde{W}^0 (\approx 1)$ $q\tilde{W}^\pm (\approx 2)$
\tilde{q}_R	$\tilde{q}_R \rightarrow q\tilde{g}$		$\tilde{q}_R \rightarrow q\tilde{B}^0$

Strong interaction

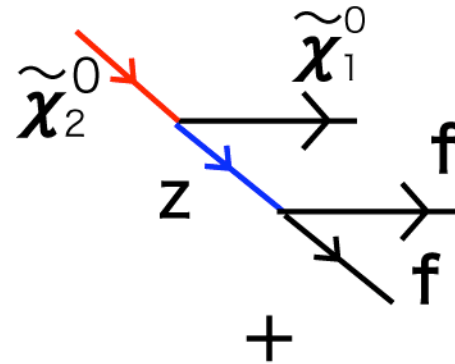
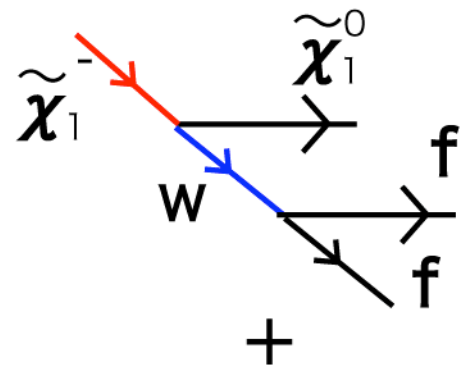
EW interaction

Massの関係やB,Wと χ の関係、第3世代などが、モデル依存度

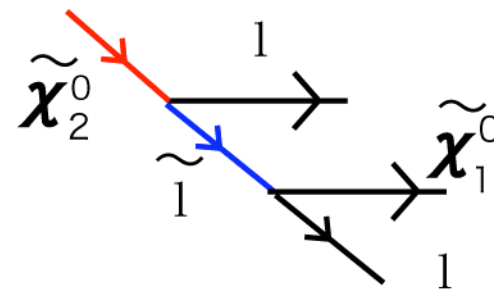
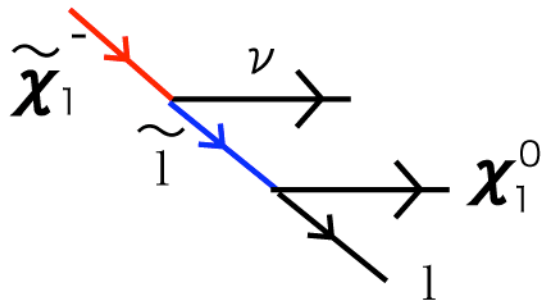
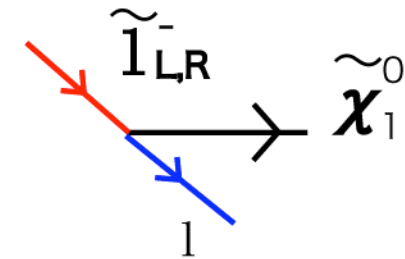


崩壊過程で生成したchargino neutralinoは、すぐに崩壊する。

Chargino崩壊過程 neutralino2 崩壊過程



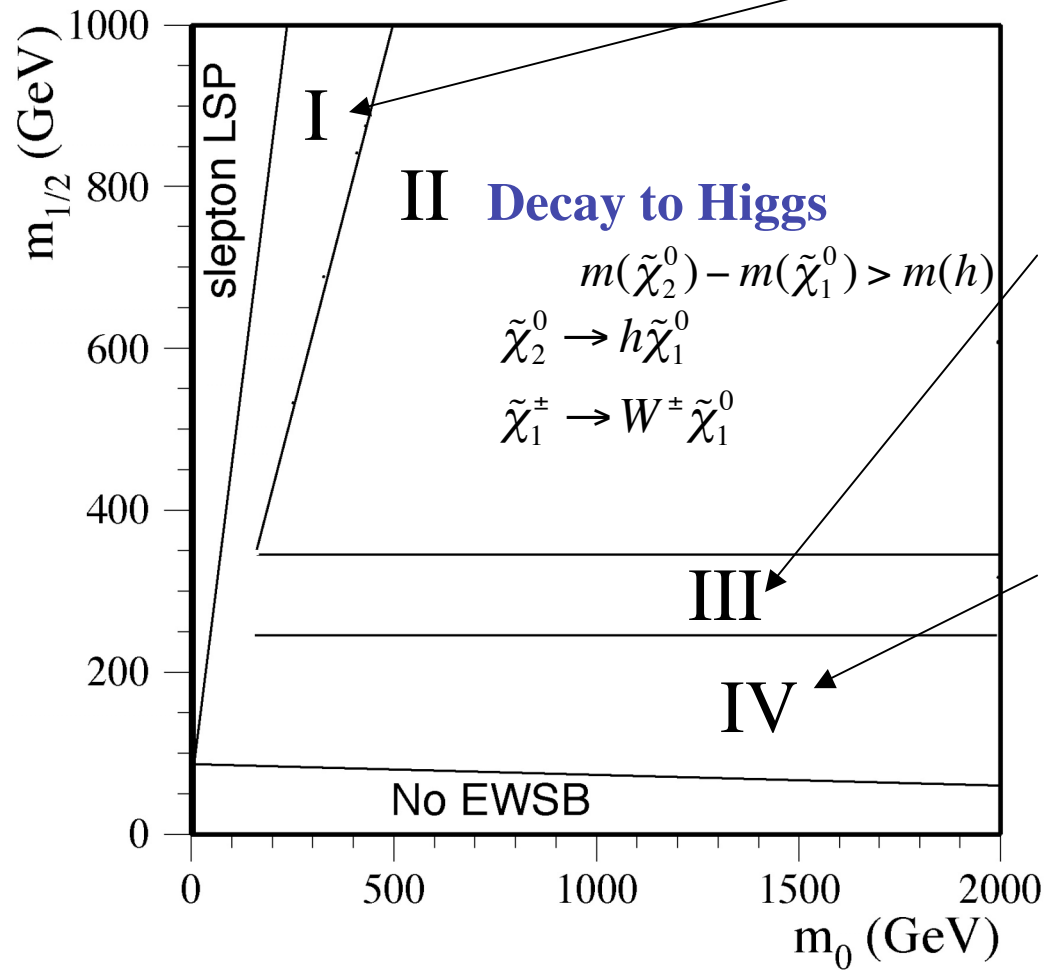
スカラーレプトン崩壊過程



Scalar leptonが軽いとlepton終状態が増加する。

Scalar lepton が chargino/Neutralinoより軽いと、2body崩壊が主。Sleptonもすぐ崩壊

$\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_2^0$ の崩壊モードについて



2-Body decay chain

$$m(\tilde{\chi}_1^\pm), m(\tilde{\chi}_2^0) > m(\tilde{\ell}^\pm)$$

$$\tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow \tilde{\ell}^\pm \nu \rightarrow \ell^\pm \tilde{\chi}_1^0 \nu$$

$$\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{\ell}^\pm \ell^\mp \rightarrow \ell^\pm \ell^\mp \tilde{\chi}_1^0$$

Decay to W/Z

$$m(h) > \Delta m > m(W, Z)$$

$$\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow Z^0 \tilde{\chi}_1^0$$

$$\tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow W^\pm \tilde{\chi}_1^0$$

3-Body decay $\Delta m < m(W, Z)$

$$\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow f \bar{f} \tilde{\chi}_1^0$$

$$\tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow f \bar{f} \tilde{\chi}_1^0$$

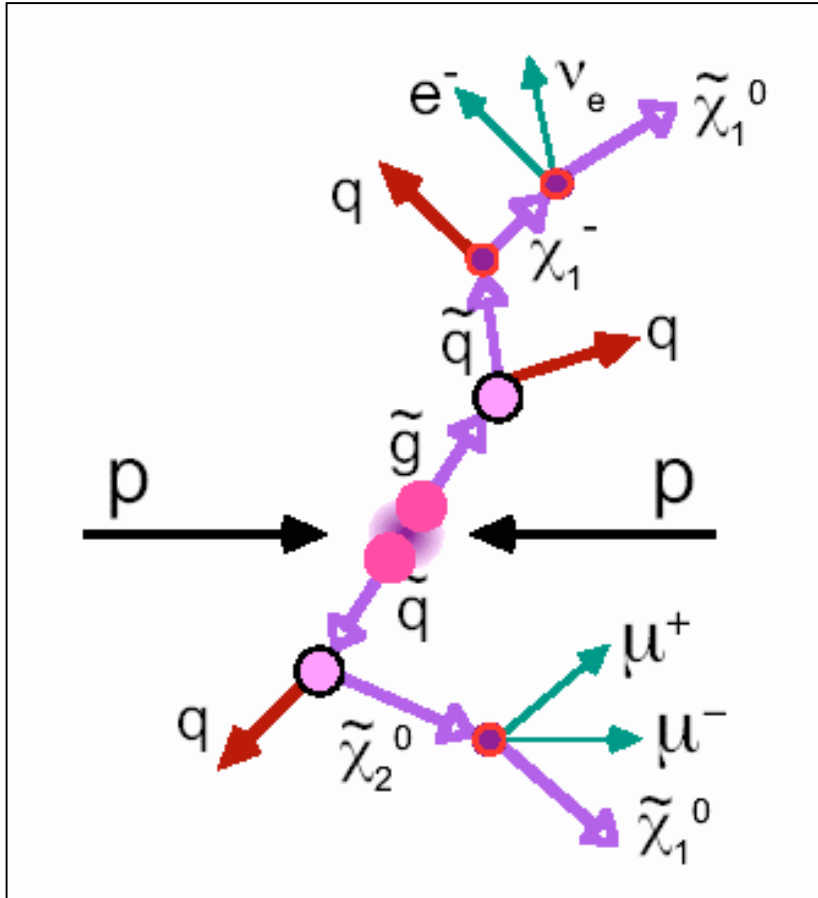
これらは基本的にkinematics
 だけであり、依存性は少ないが
 モデル依存性は ★★★

Higgsino成分??

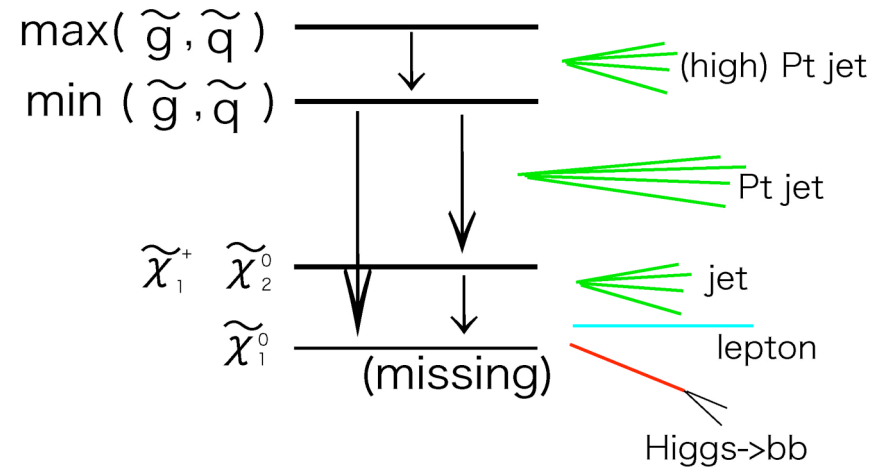
Sfermion propagatorで3body

LEPで見ていた所は、IVの下の方のあたり。

多段のカスケード崩壊が観測される。
 (非常に特徴的)



大雑把に言うと

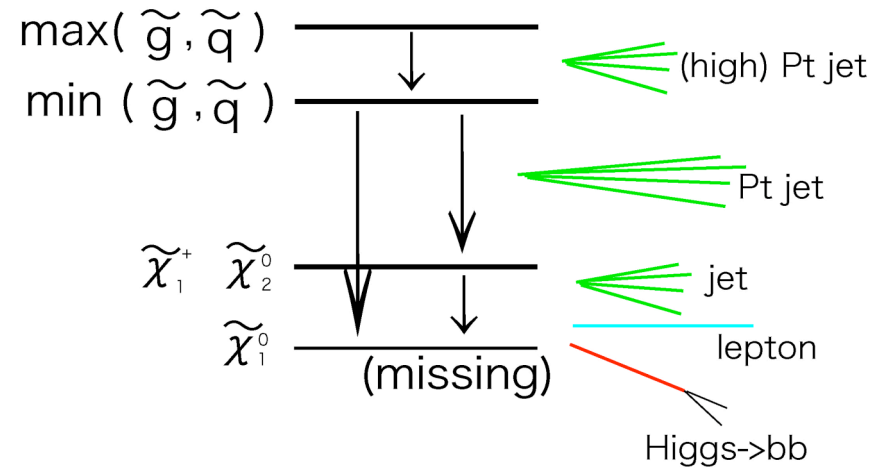
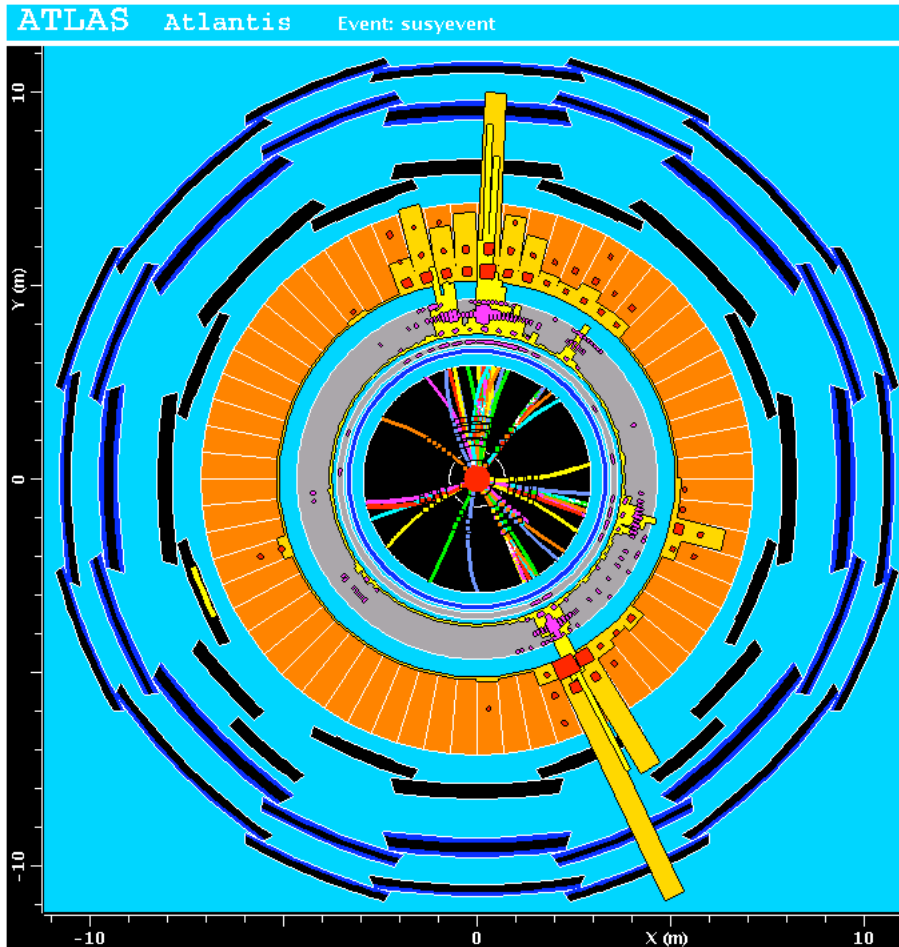


期待されるevent topologyは、

multi leptons
 $E_T + \text{High } P_T \text{ jets} + \text{b-jets}$
 τ -jets

多段のカスケード崩壊が観測される。
(非常に特徴的)

大雑把に言うと



期待されるevent topologyは、

multi leptons
 $E_T + \text{High } P_T \text{ jets} + \text{b-jets}$
 τ -jets

2. 発見能力（皮算用）

期待されるevent topologyは、

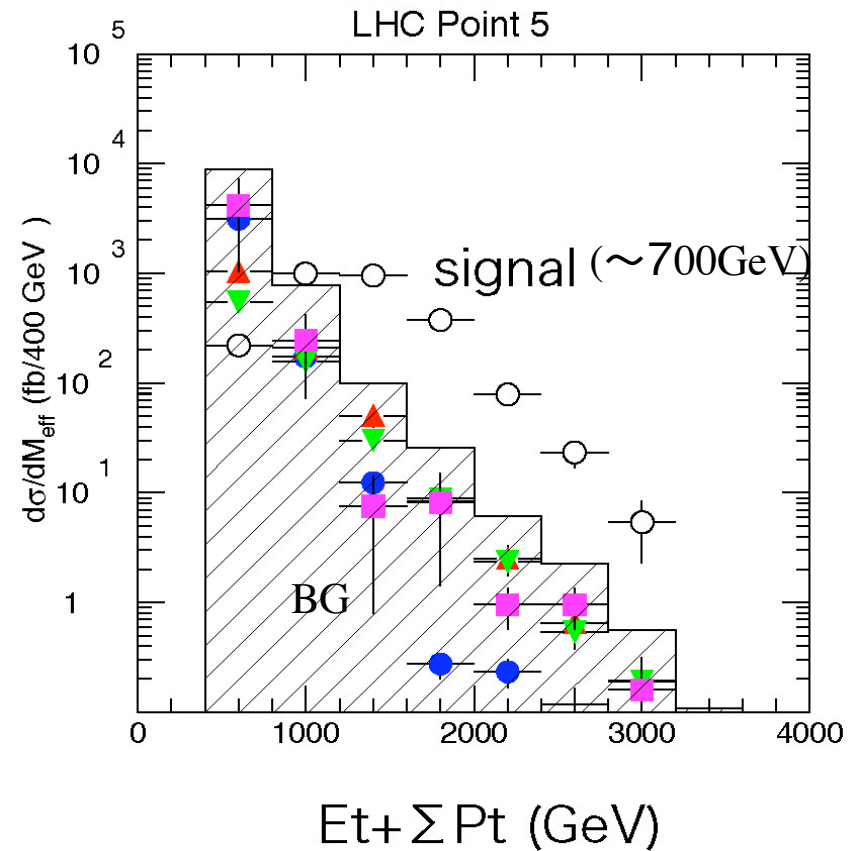
multi	leptons
$E_T + \text{High } P_T \text{ jets} + \text{b-jets}$	
	τ -jets

・BGは、tt, multijets, Z+njets, W+njets
Leptonの有無でBGの配合が変わる。

- (1) No lepton mode（一番感度高いと思われるモード） →
QCDjets, Z+njets, W(->tau)+njets
- (2) One lepton tt, W+njets (MT cut)
Z->tautau+njst
- (3) Two lepton (SCなど)

(BGの研究 → 後ほど)

- Missing E_T の測定、
high Pt jetの較正がkeyになる。
(後ほど)

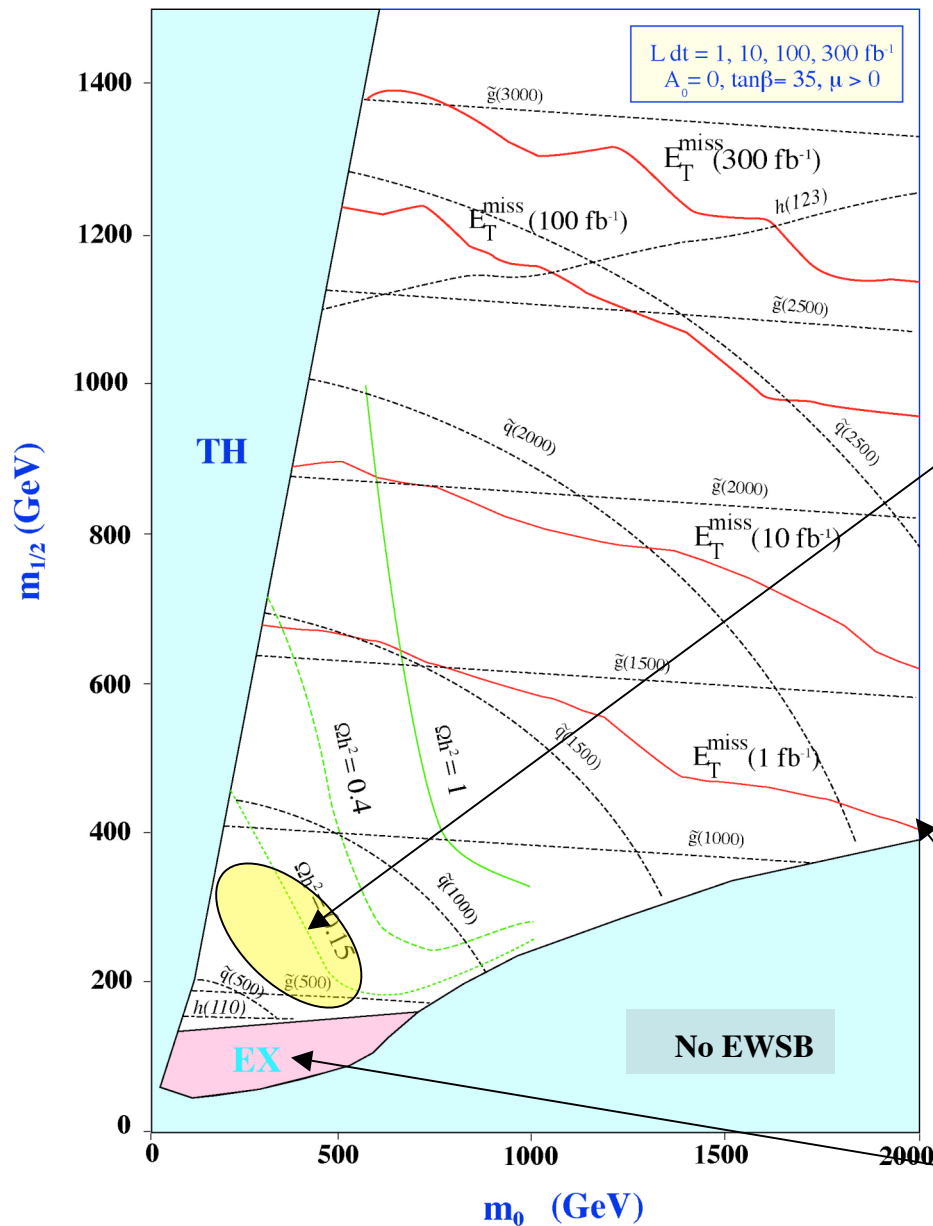


Discoveryは容易だろう (?)

- 大切なのは、このmass difference
と $\sigma(\text{coloured mass})$
モデル依存度は低い (★★★程度)

オマケの部分は ★★★

mSUGRAの発見能力 (モデル依存度 ★★★)



★★★ でもあまり変わらない。

L=300fb⁻¹ で約**2.5TeV**まで

Cold DMとして面白い領域は
ほぼ**一週間のrun**で十分

約**1年のrun**(L=10fb⁻¹)で、 \tilde{g}, \tilde{q} 約**2TeV**まで。

GUT: $\tilde{\chi}_1^\pm$ 約700GeVに相当
★★★ $\tilde{\chi}_1^0$ 350GeV
(LEP・従来の7倍の領域！)

約**1ヶ月のrun**(L=1fb⁻¹)で $\tilde{g}, \tilde{q} \sim$
1.5TeV

まで5 σ の有意さで発見可能

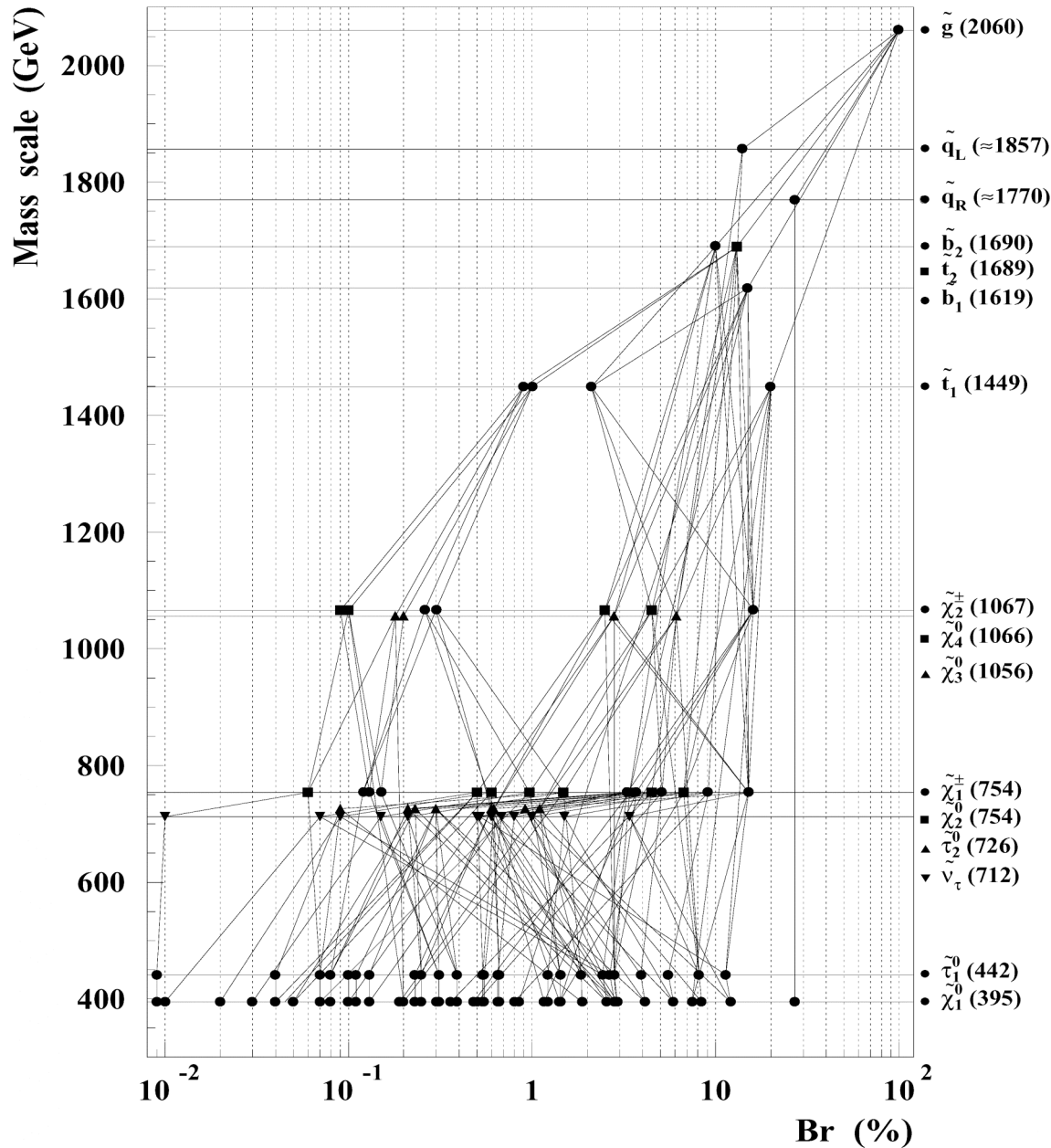
LEPの探索領域がこれ。

話が簡単にすまないケース（第3世代とHiggsino成分）

	$m(\tilde{g}) < m(\tilde{q})$	$m(\tilde{g}) \approx m(\tilde{q})$	$m(\tilde{g}) > m(\tilde{q})$
\tilde{g}	$q\bar{q}\tilde{B}^0 (\approx 1)$ $\tilde{g} \rightarrow q\bar{q}\tilde{W}^0 (\approx 2)$ $q\bar{q}\tilde{W}^\pm (\approx 4)$		$\tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}$
\tilde{q}_L	$\tilde{q}_L \rightarrow q\tilde{g}$	$\tilde{q}_L \rightarrow q\tilde{W}^0 (\approx 1)$ $q\tilde{W}^\pm (\approx 2)$	
\tilde{q}_R	$\tilde{q}_R \rightarrow q\tilde{g}$	$\tilde{q}_R \rightarrow q\tilde{B}^0$	

Higgsino成分がdecoupleしない(mixed region or 3rd generation)
 Bino,Wino \leftrightarrow $\chi_{1,2}$ が対応しない

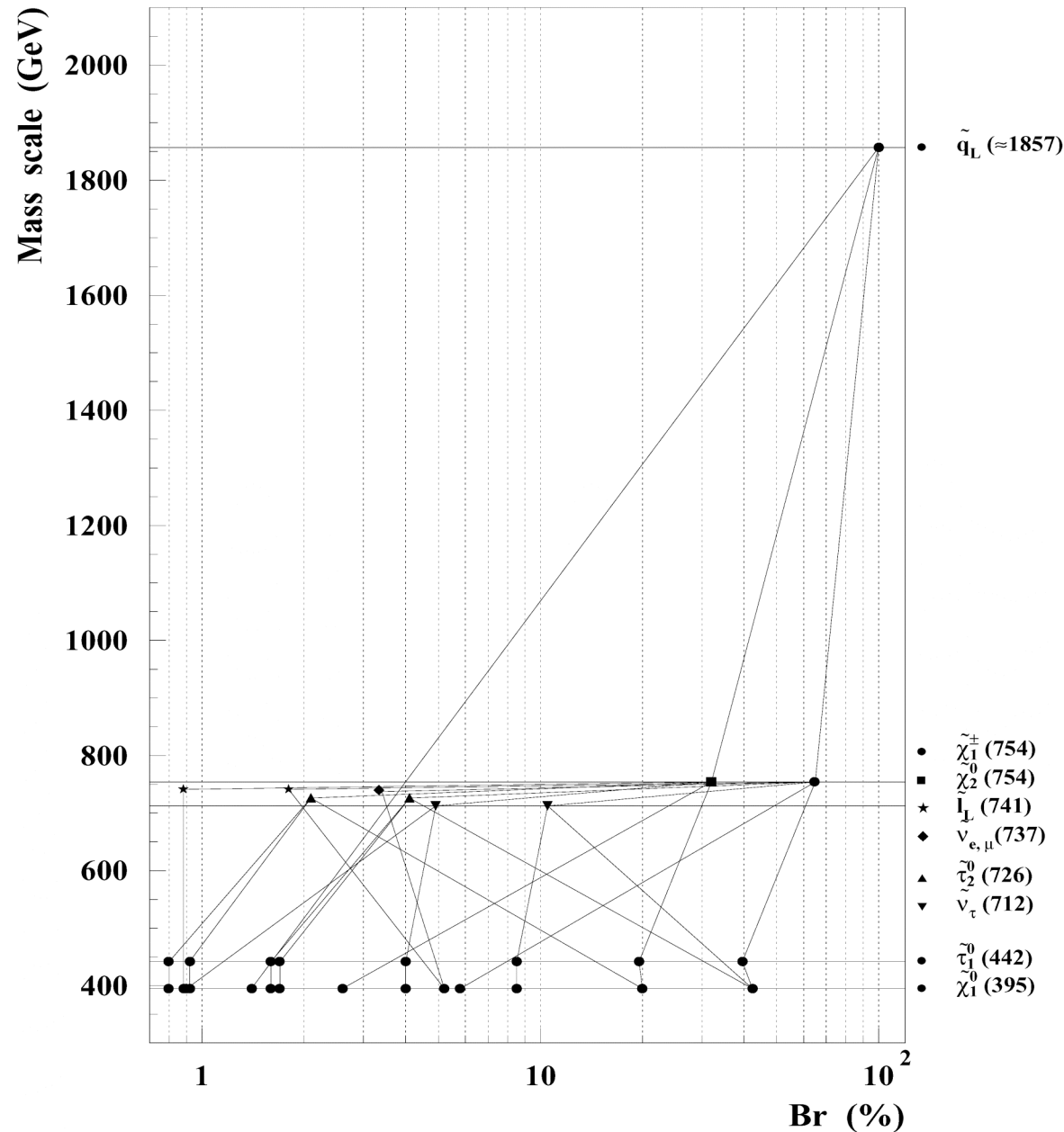
tanβ=35の時のgluinoのdecay chain



- 由緒正しい崩壊以外に
- 第3世代が軽い場合
gluino → b sb
 t st
がかなり起きる。
(phase space)
Br = 0.1-0.6
st, sb は大きなyukawa
を持っているのでHiggsino
によくくっつく。
(ダイアグラム)

Bjetが増えて、
jet Multiplicityが増える。
この領域にパラメータが
あると非常に特徴的

A $\tan\beta=35$ の時のsquark_Lのdecay chain



gluinoは複雑でも
squarkはsimpleなまま。

Higgsino mass (μ) が
大きく、decouplingし
ているので。

もし、 μ が $0.8m_{1/2}$ 以下で
gauginoと混合しはじめる
と複雑になる。
qL→N3,4→N1,2が起きる
(one step増える)

Higgsinoは、 μ を測定する
上で重要な要素。

3. SUSY発見に必要となる研究課題

2007, 8年に蓄積された $1-10\text{fb}^{-1}$ (予定: デザインの $1/100-1/10$) の積算ルミノシティで発見を行う。

(1) さっき話した様に原理的には、 $\text{mass } 1.5\text{TeV}(L=1\text{fb}^{-1})$ ---- $2\text{TeV}(10\text{fb}^{-1})$ まで発見が可能であるがかなり胡散臭い研究で これを現実的にする。
Backgroundの再評価と実験データを用いたバックグラウンド評価法に確立

(2) SUSYの鍵は、high Pt jet & missing E
この二つのcalibrationと systmstic 評価 TriggerもOK?

(1)(2)はexcessの確立

(3) 見えたexcessが、SUSYかどうか? の同定

Msugra? SUGRAの一派、GM(slepton LSP, gamma)

現在、Identificationの議論が全くない。(特にLuminosityが少ない時に)

「Lがたまって30-300 fb^{-1} endpointが見えて、mSUGRA仮定して、

mass計算して、、、」を議論している

そのまえの議論:

また、同定で大切になる ID (b, lepton など) の開発とfakeの評価

(3) 原理の確立(への一歩)

(3-1) BGの再評価

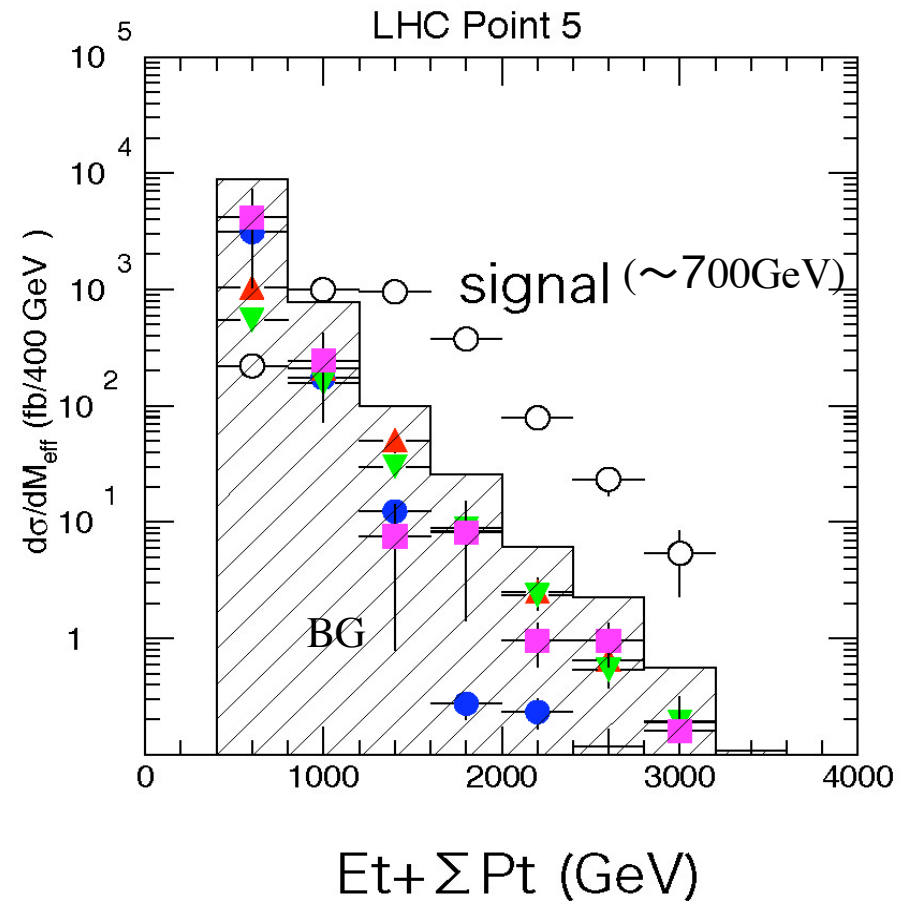
Large missing E_t の要求以外に、
High Pt 2 jetや4jetを要求して
BGを押さえている。

このHigh Pt jetをParton showerで
評価している。

(W/Z+1jetはN=1までME
N \geq 2からParton shower,
ttは、N \geq 1からPS)

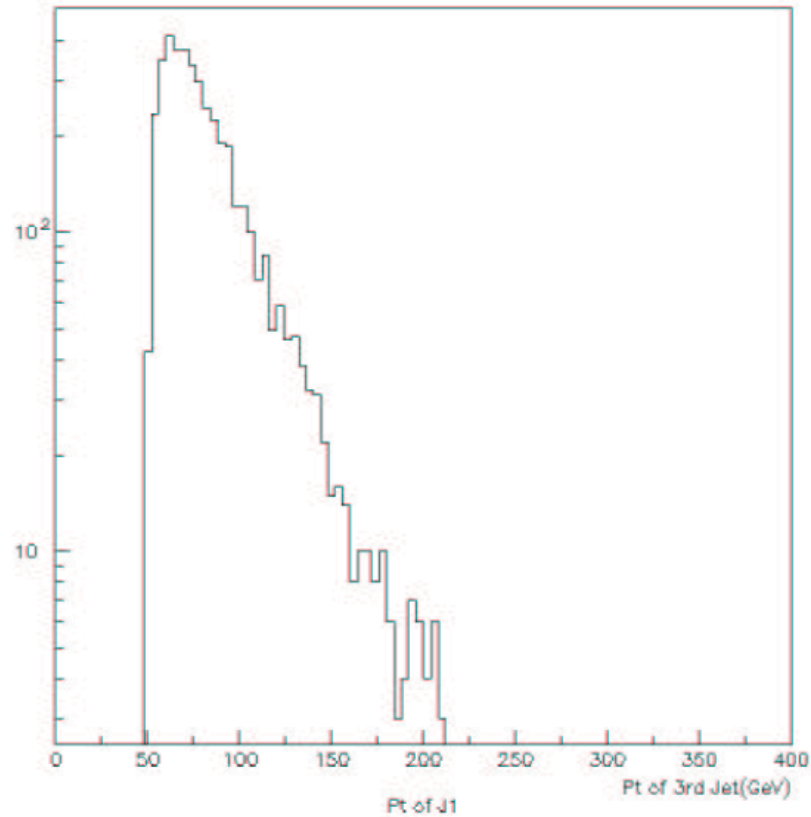
PSは、collinear 発散やSoft発散が
効く領域では有効だが、High Pt 領域
では不十分である。

BGももっとHigh Pt jetが出るはず。
結果 missingも大きくなる。



Ex: good separator $E_t_{\text{miss}} + P_t$ of 4jets
相対的に、 $E_t + \text{sum } P_t$ の高いところが高くなる。

Pt distributions of 3rd jet(parton for ALPGEN)

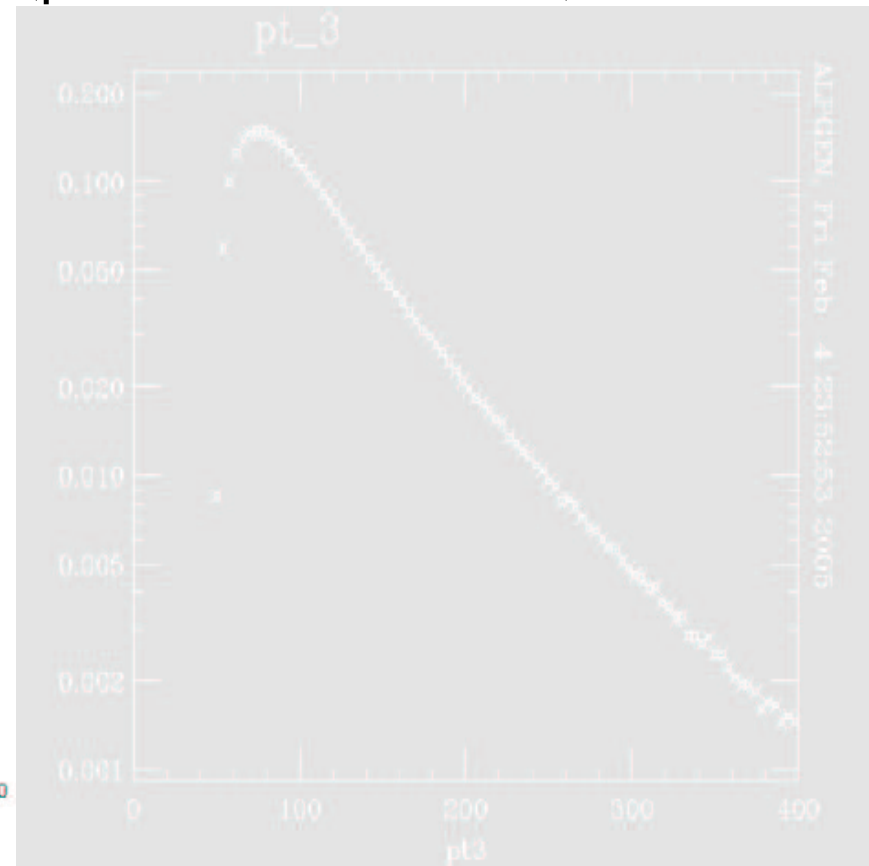


Parton shower (PYTHIA 6.203)

Missing Et > 100GeV

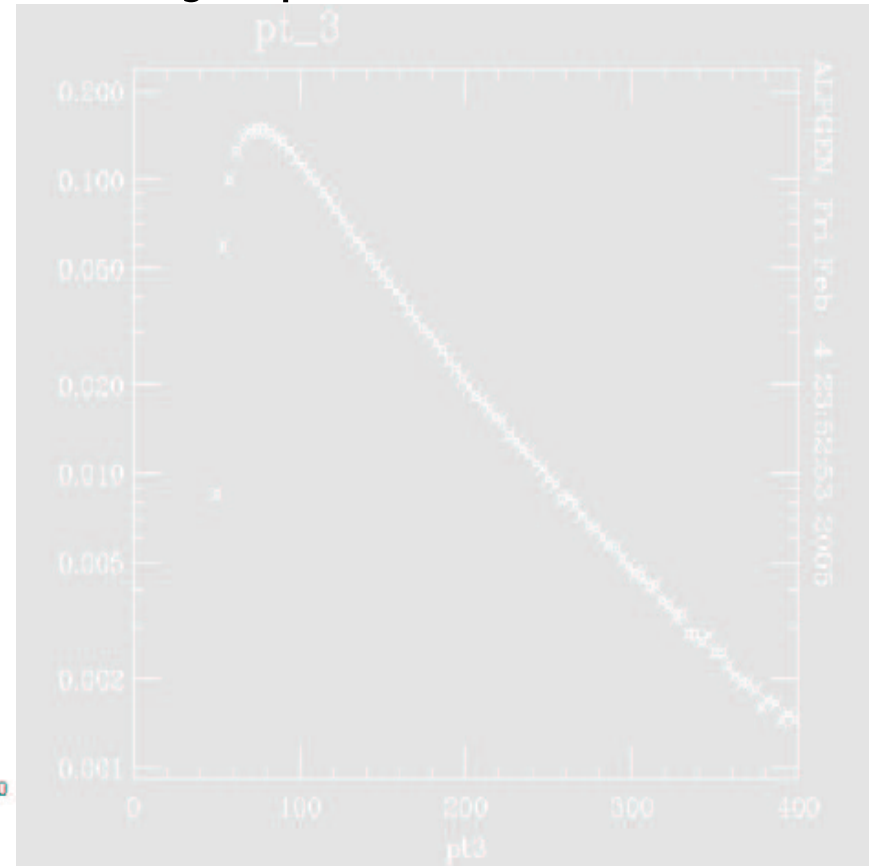
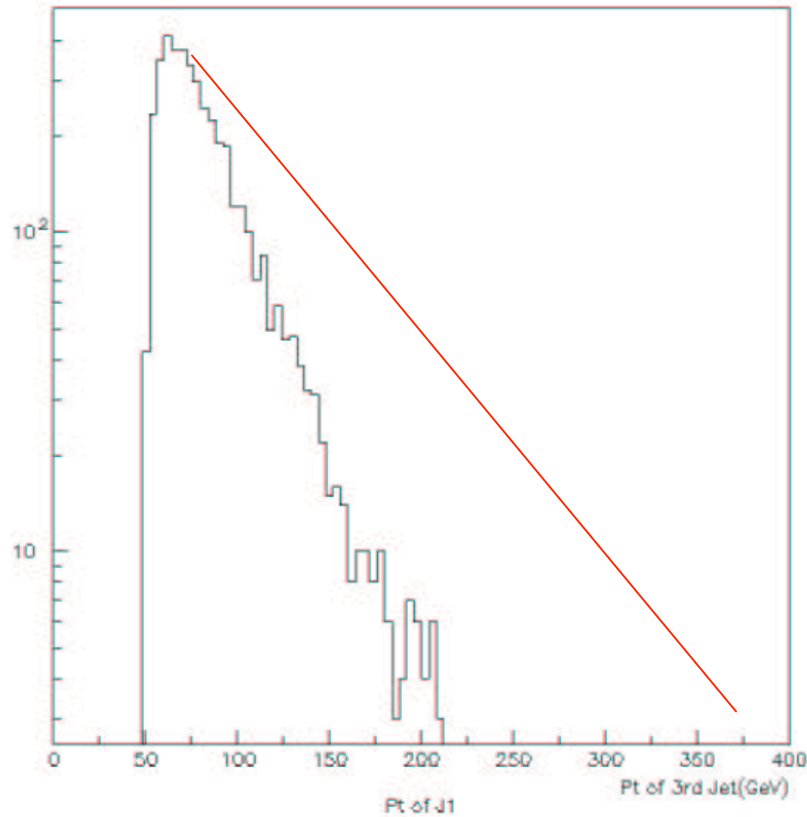
At least one jet(parton) has pt > 100GeV

At least four jets(partons) have pt>50GeV



Matrix element (ALPGEN) Parton level

For example, Pt distributions of 3rd jet(parton for ALPGEN)



Parton shower (PYTHIA 6.203)

Matrix element (ALPGEN) Parton level

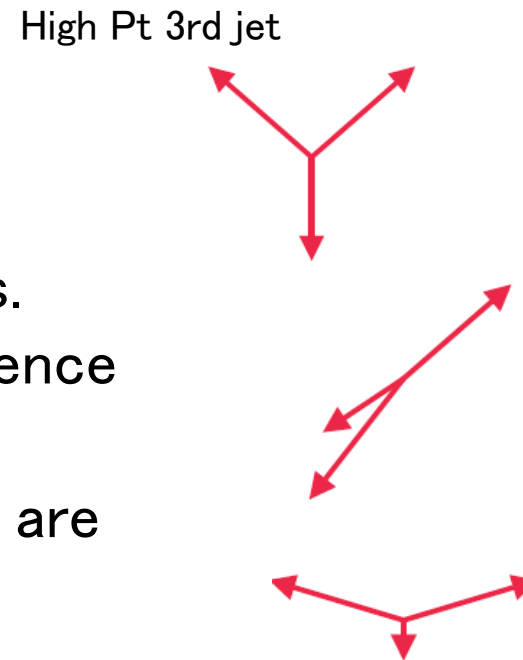
ME prediction is superimposed on PS prediction,

Large difference is observed in the region of $Pt > 100 \text{ GeV}$.

Hard jet does not emit in PS.

PS vs ME

ME has advantage for high Pt jet
as you can see in the previous plots.
To remove collinear and soft divergence
Pt and Rj are required.
Soft and collinear kinematic regions are
covered by PS:

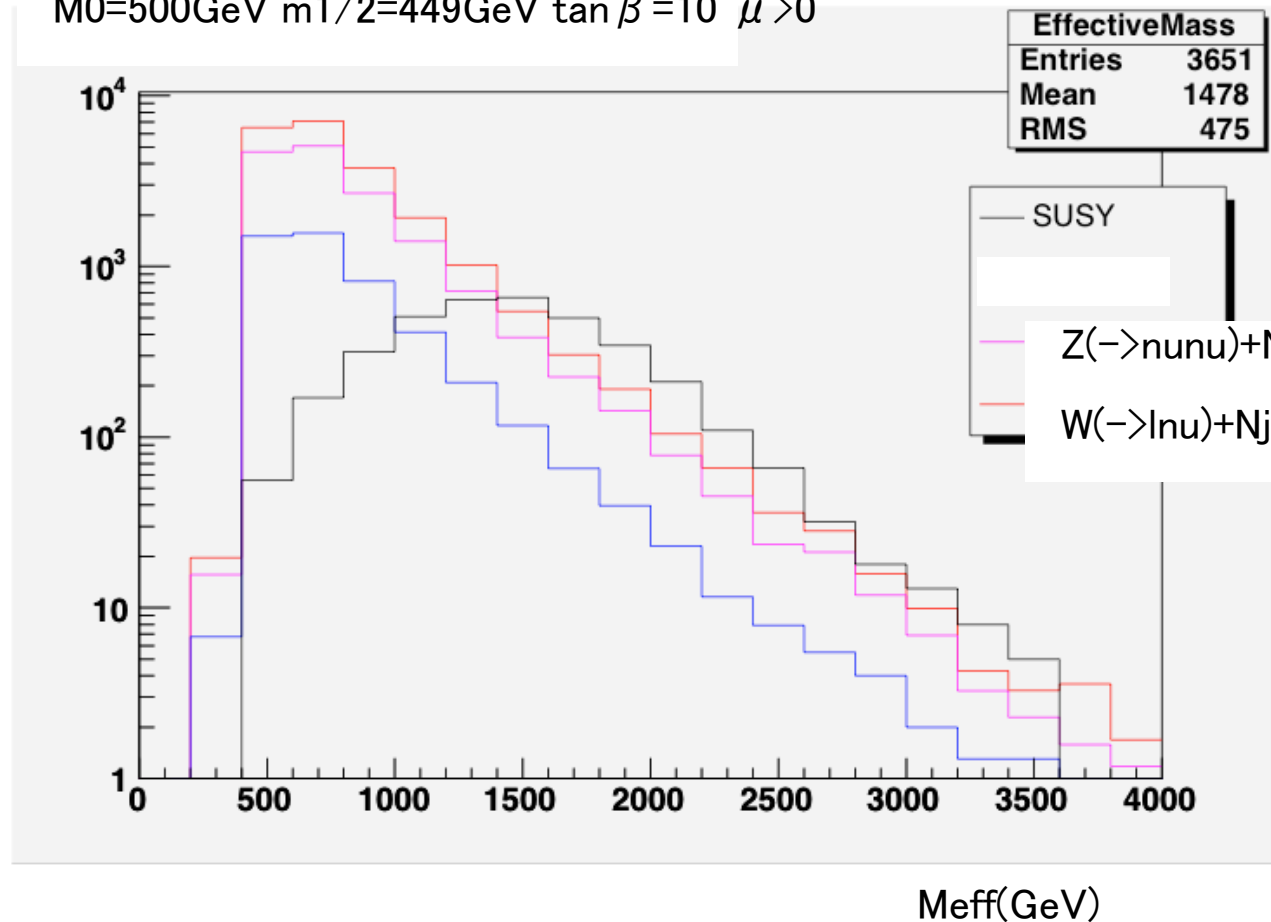


We set boundary between ME and PS
at $P_t > 20 \text{ GeV}$ and $R_j > 0.7$.
Smooth matching (like CKKW)
are not performed. Just kinematical separation.

We produced **exclusive samples** for
 $W/Z + N_{\text{jets}} (N=4,5,6)$ with some preselections.

0-lepton mode $L=10\text{fb}^{-1}$ $M_{\text{susy}}=1\text{TeV}$

$M_0=500\text{GeV}$ $m_{1/2}=449\text{GeV}$ $\tan\beta=10$ $\mu>0$



Preliminary!!

TDR

1000counts/200GeV
@ $M_{\text{eff}}=1\text{TeV}$
(factor 3)

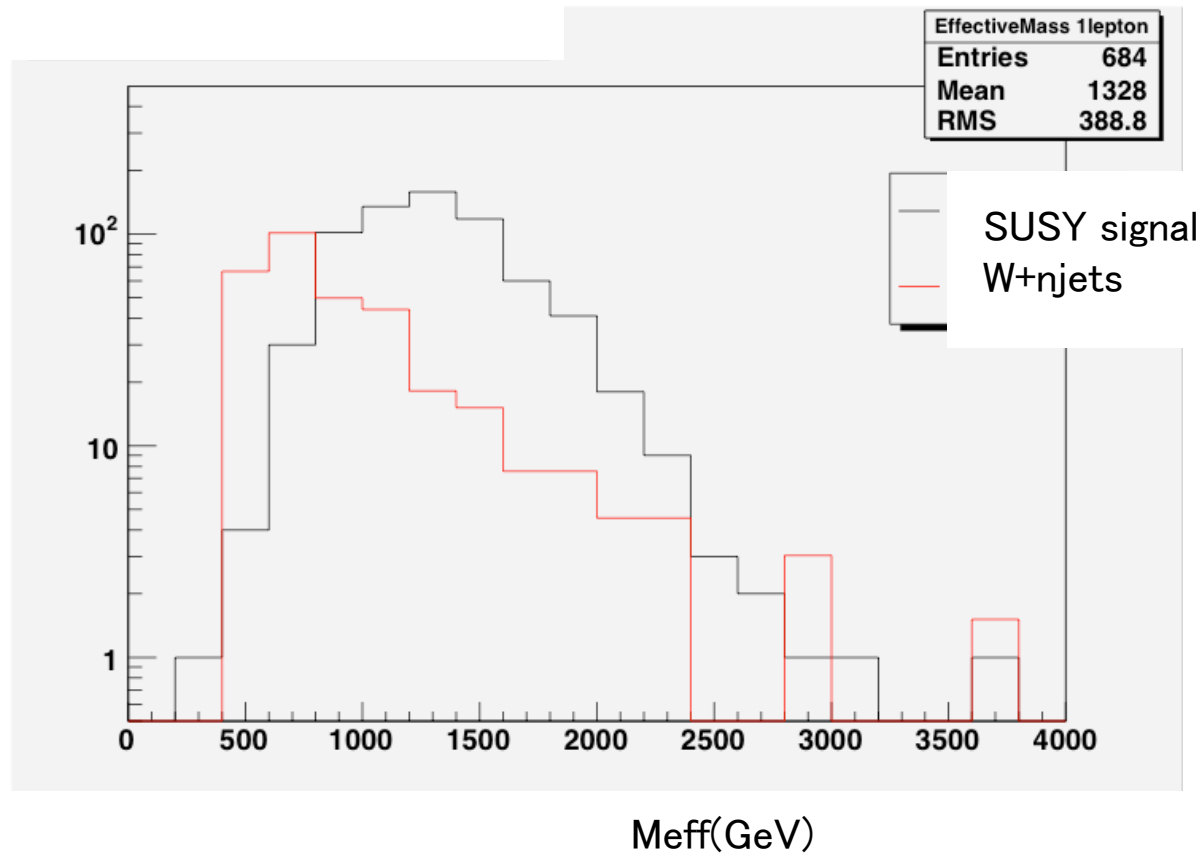
40counts/200GeV
@ $M_{\text{eff}}=1.8\text{TeV}$
(factor 5)

3counts/200GeV
@ $M_{\text{eff}}=2.6\text{TeV}$
(factor 8)

Numbers of Background increase by factor 3 to 8 depending on kinematics. Slope of BG is the same as signal.

Discovery is not easy work?. (still preliminary)

One lepton mode: $M_0=500\text{GeV}$ $m_{1/2}=449\text{GeV}$ $\tan\beta=10$ $\mu>0$



If one lepton is required, number of signal is reduced by factor 0.2 for this case, but QCD, $Z \rightarrow \nu\nu$, $W \rightarrow \tau\nu$ background processes can be suppressed. One lepton channel looks like to be more promising. (?) ($Z \rightarrow \tau\tau \rightarrow \text{HL}$, and top-pair background are not yet taken into account.)

MEとPSを共存させることは、なかなか難しい話で、まだ研究中：
-- SUSYの発見もまだまだ研究しなければならないことはいっぱいある。--

- 一> 学会 3/25 9:00 佐々木君の学会講演(この絵の続き)
- 一> 4/9(土) 午後1時より センター会議室で SUSY WG meeting?
- 一> Leptonの数で分けて、もう一度解析の再調整 (FAST)
最終的にどこまでいけるか? Missing+jet チャンネルは辛い?
相当幅広く研究しないとイケない。
(下手をすると、1TeVより重いSUSYの発見は難しくなる)
- 一> Z,W+Njets BGを実験データで,Normaliseする時(しないといけない)
DY+ Njets BGでNormaliseして、誤差がどの程度あり、どう
実験データに伝搬するか?の研究 (MC ready FAST)
どう scaleを選ぶべきか? Kinematic を変えて選んだ コントロールサンプル
の誤差がどのくらいextrapolate出来るのか(MCの助けをかりて)
- 一> tt+njetの BGの同様の研究 (MC ready FAST)
- 一> QCD BGの評価 (FAST+FULL) まだno idea
- 一> WW,WZ,ZZ BGの効果(+PSはready Fast)

(3-2) Missing Et & jet energy scale の研究 (Full ネット)

SUSYの発見でkeyになるのが、missingの測定 と jet energy の測定

→jet の energy: “Jet”をどう作るか? Cone R=0.4 or 0.7

Ktアルゴリズム:

実験初期に安定して使えて、

十分Calibration 出来るか

Noise, Hot clusterに対応出来る様に、Kt?

Cone+QCD補正の方が?

→ Missing Et どう計算するか? Jets+C(cell of jet)+Lepton or -(CELL)+Lepton
(CMS) (ATLAS)

CELL単位でHadronとEMのcalibrationが必要 (e/h=1.2)

(Jetにすると overall にcalibrationできる。Size 依存がでる)

CELLでやると、Noise があるので、加える条件を THSを設定する

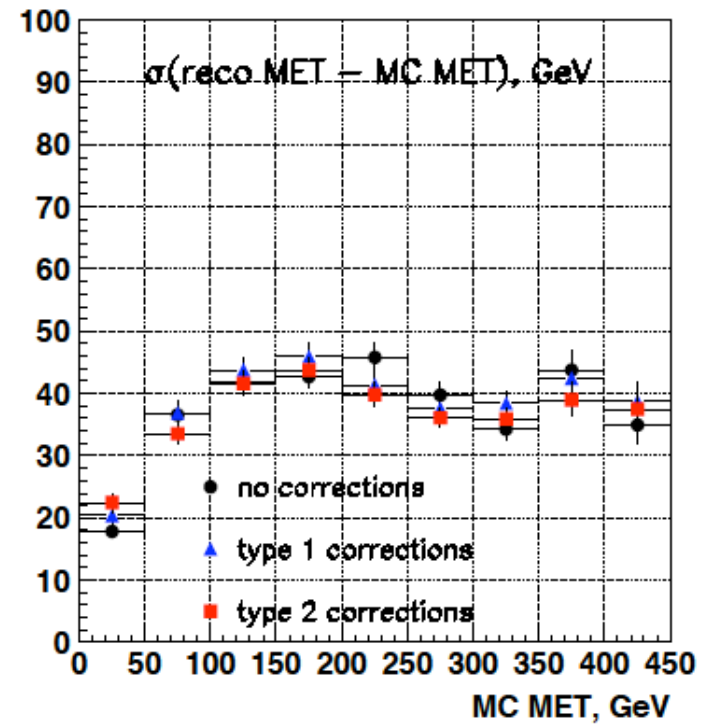
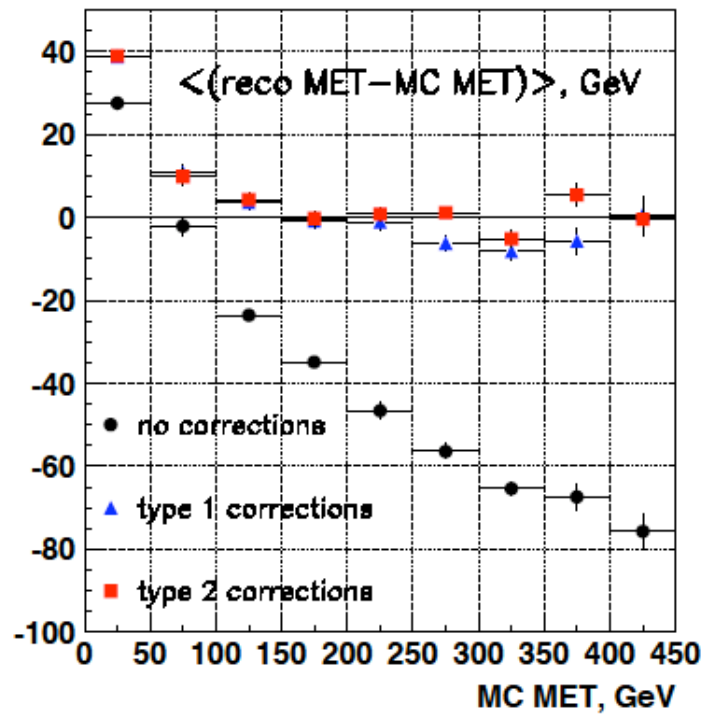
softな成分が逆に落ちてしまう。(前回のHiggs VBF tautau と同じなやみ)

→ topology で clusteringする? (流行になりつつある)

→ tracker? (私の勝手な想像1)

→ 縦(深さ)方向情報? (2)

勝手な意見ですが、SUSYは、JET基本のほうがいい?



CMSの研究 Jet+tower

Higgsはlow Etが効くから駄目だけど、SUSYはhigh Etだから、

Topological clustering (Noise 633 420 model)

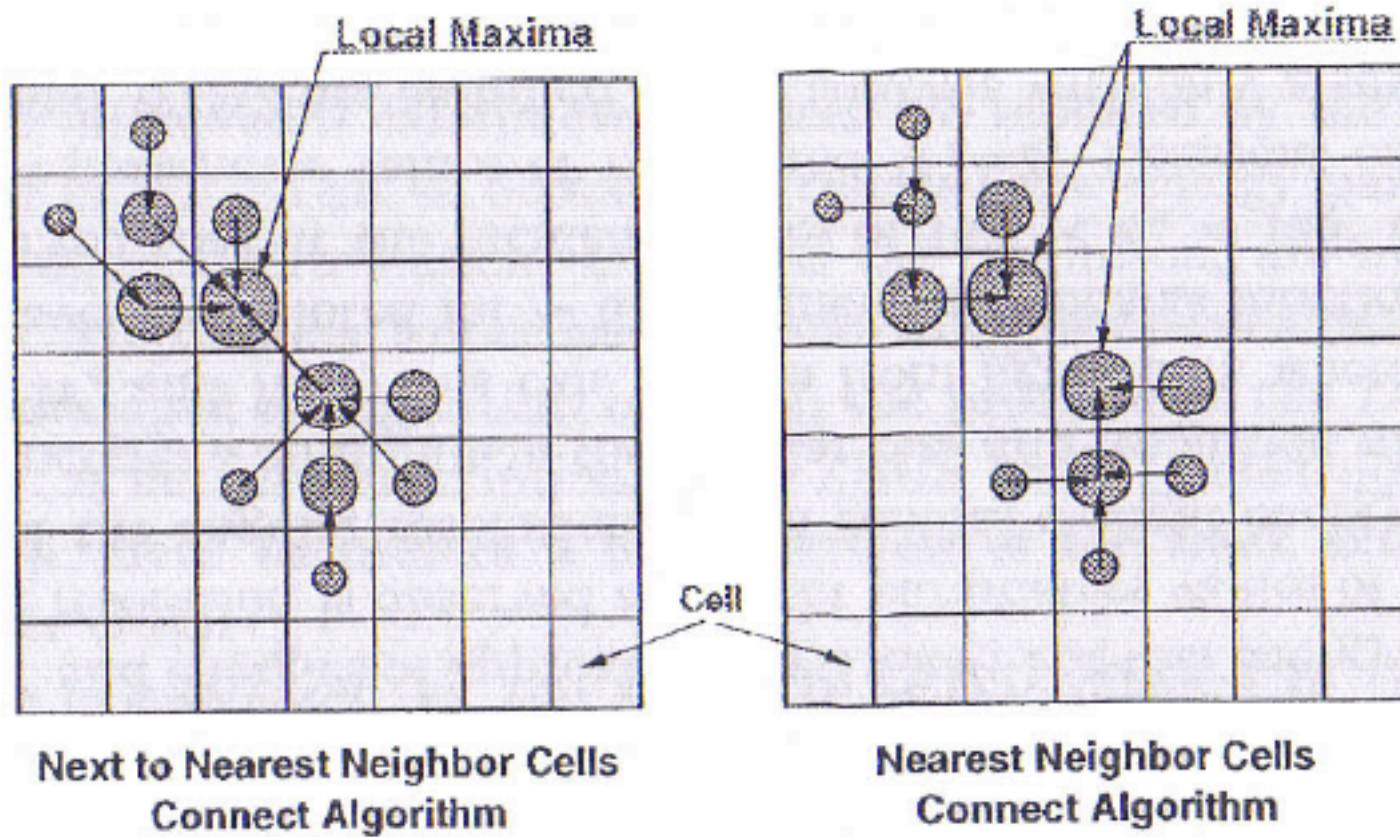
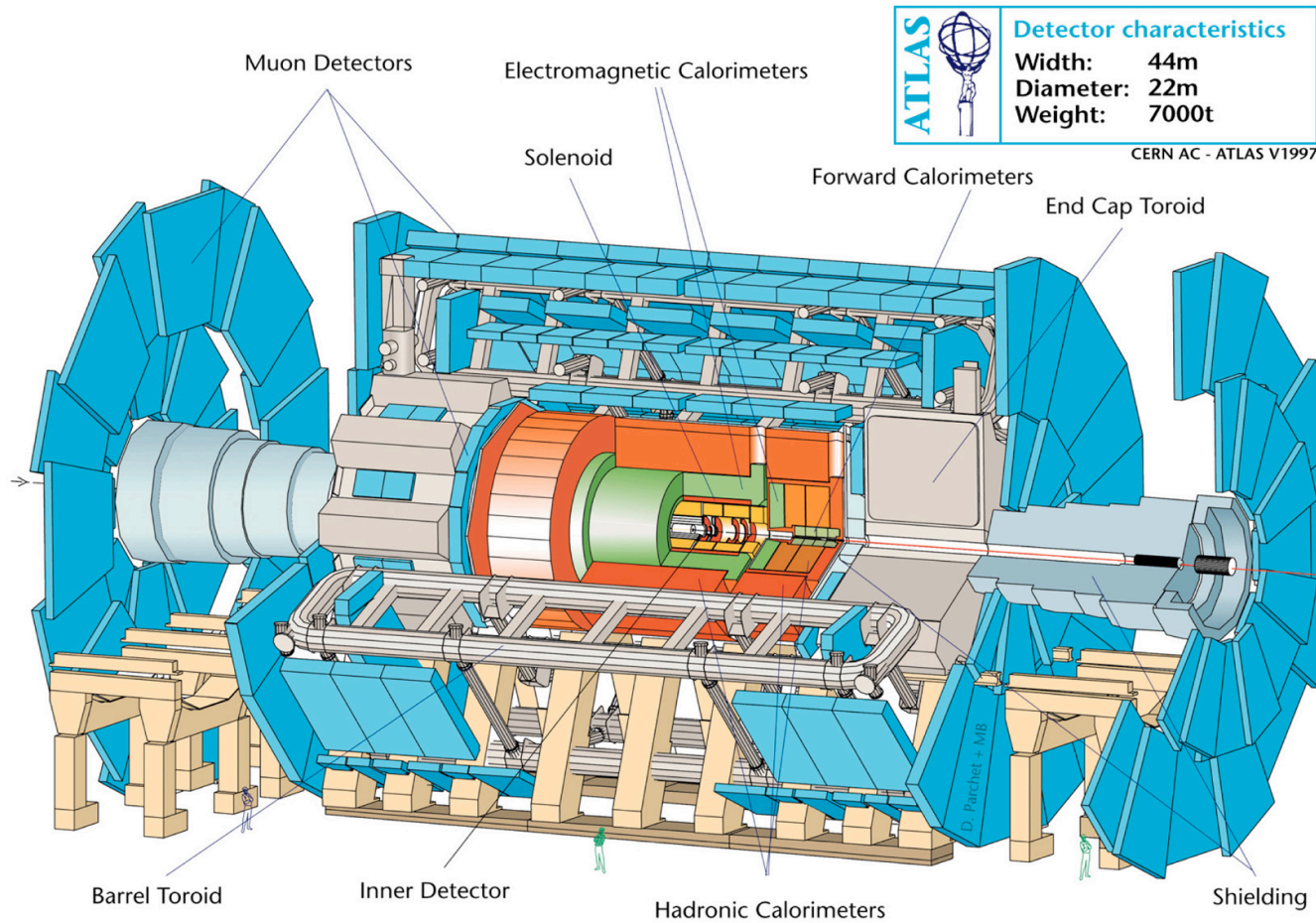



Figure 5.7: Schematic representation of the cell island clustering.

ATLAS検出器



	Detector characteristics
	Width: 44m
	Diameter: 22m
	Weight: 7000t

CERN AC - ATLAS V1997

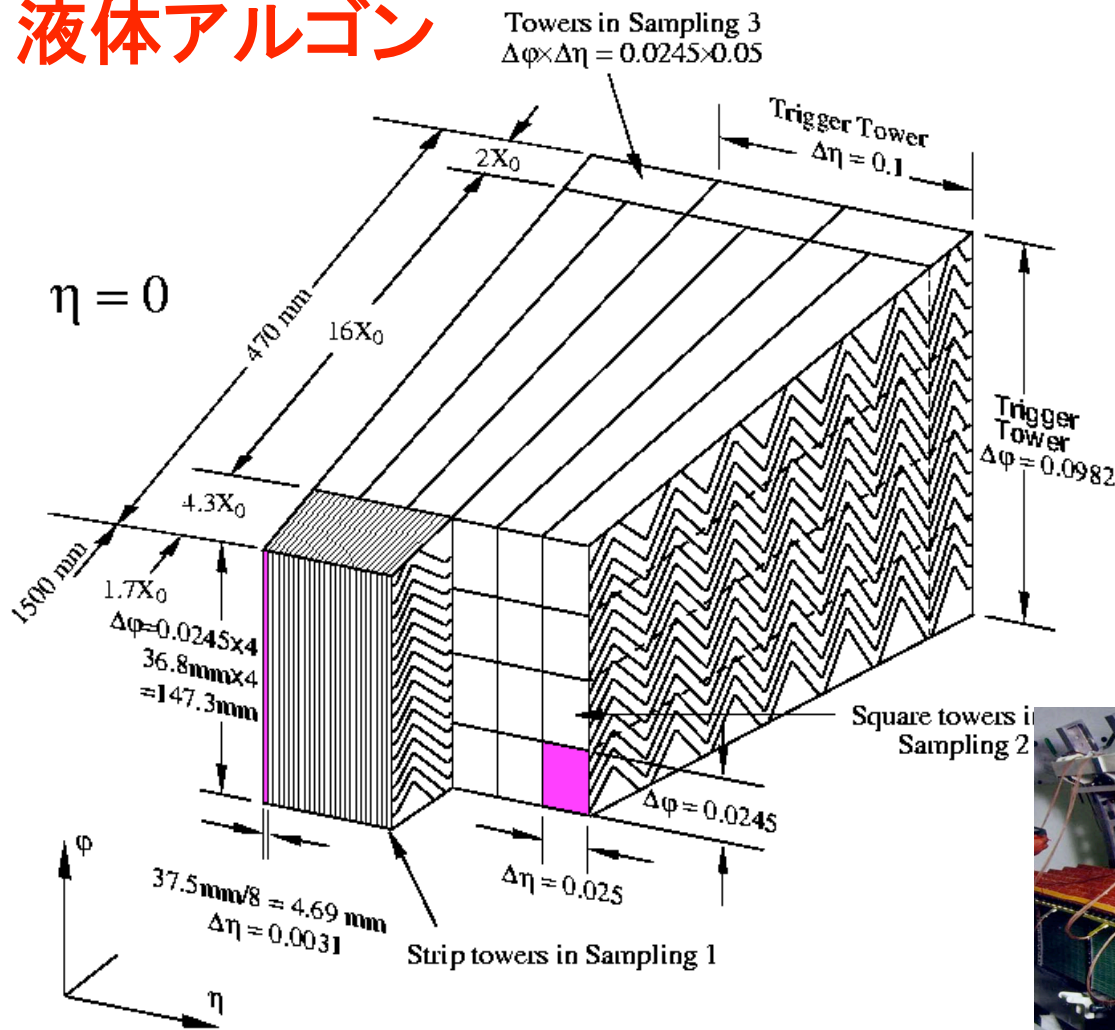
E,P分解能
($P \sim 100\text{GeV}$)

$\mu \sim 2\%$
 $e, \gamma \sim 1.5\%$
Jets $\sim 8\%$

1. Si, TRT, 2TのソレノイドによるTracking system
2. Li.Ar を中心としたカロリメーター
3. 空芯トロイド ミューオン検出器

- 厳しい放射線環境
- 高速 25nsec
- 320Mbyte/secのデータ (1TB/hour)
- 1億6千万チャンネルの読み出し

ATLAS 液体アルゴン



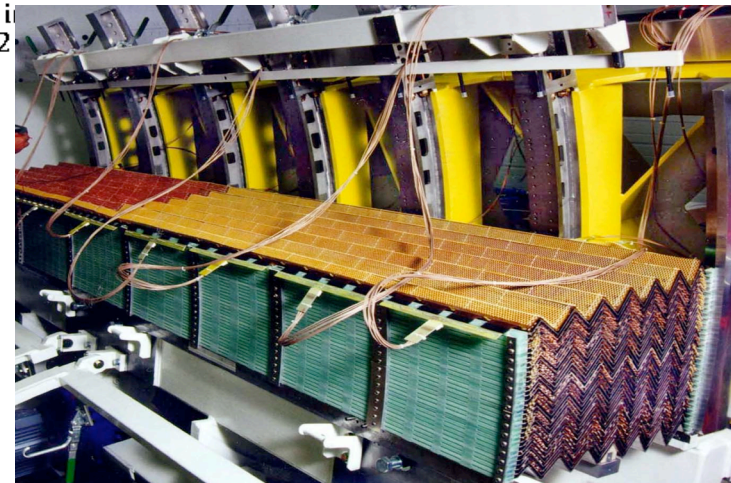
22Rad.length
100GeV(95%)

$$\sigma / E = 10\% / \text{SQRT}(E) + 0.3\% + 0.5$$

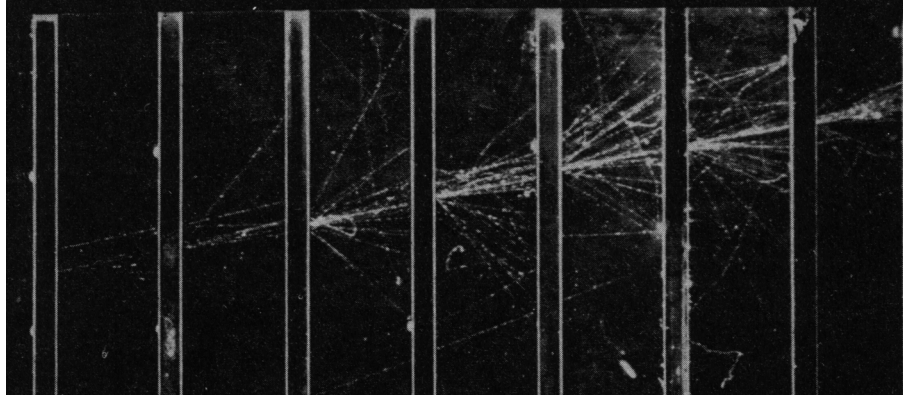
Fine: 0.025*0.025

第一段目の $\eta : \pi / \gamma$

角度分解能 **50mrad** / SqrtE



Zの大きい鉛がお得



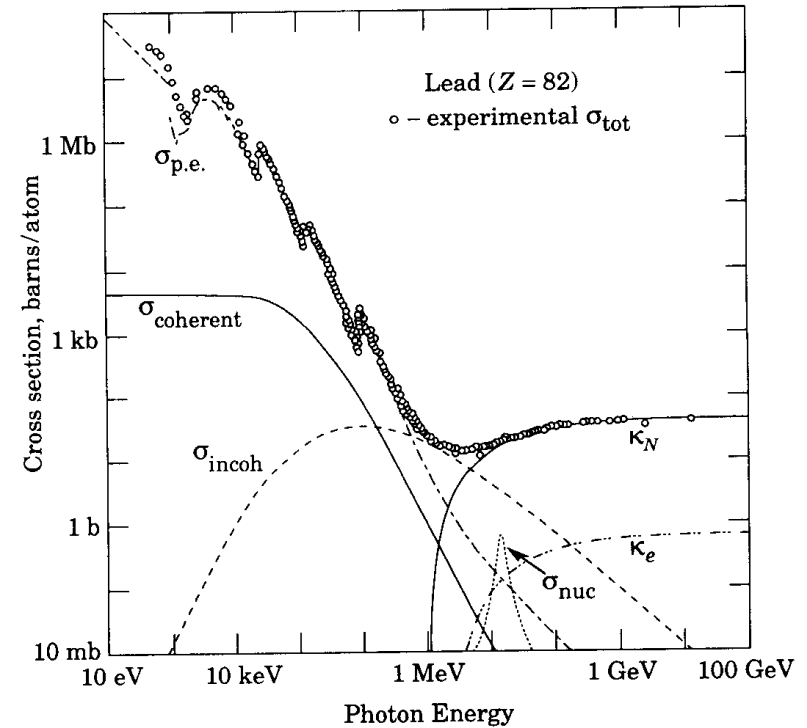
$E_c = 12 \text{ MeV}$

縦方向 $t_{\max} = \ln \frac{E_0}{E_c} \frac{1}{\ln 2} = 13 (\text{for } 100 \text{ GeV})$

$t_{95\%} \approx t_{\max} + 0.08Z + 9.6 = 23 (100 \text{ GeV})$

横方向 $R_M = \frac{21 \text{ MeV}}{E_c} X_0 \quad [g/cm^2] = 1.8 X_0$

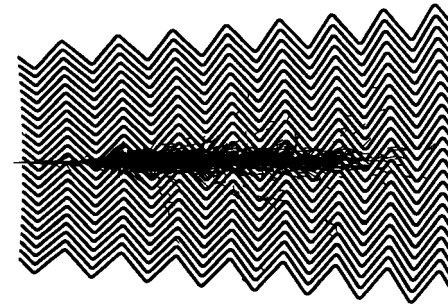
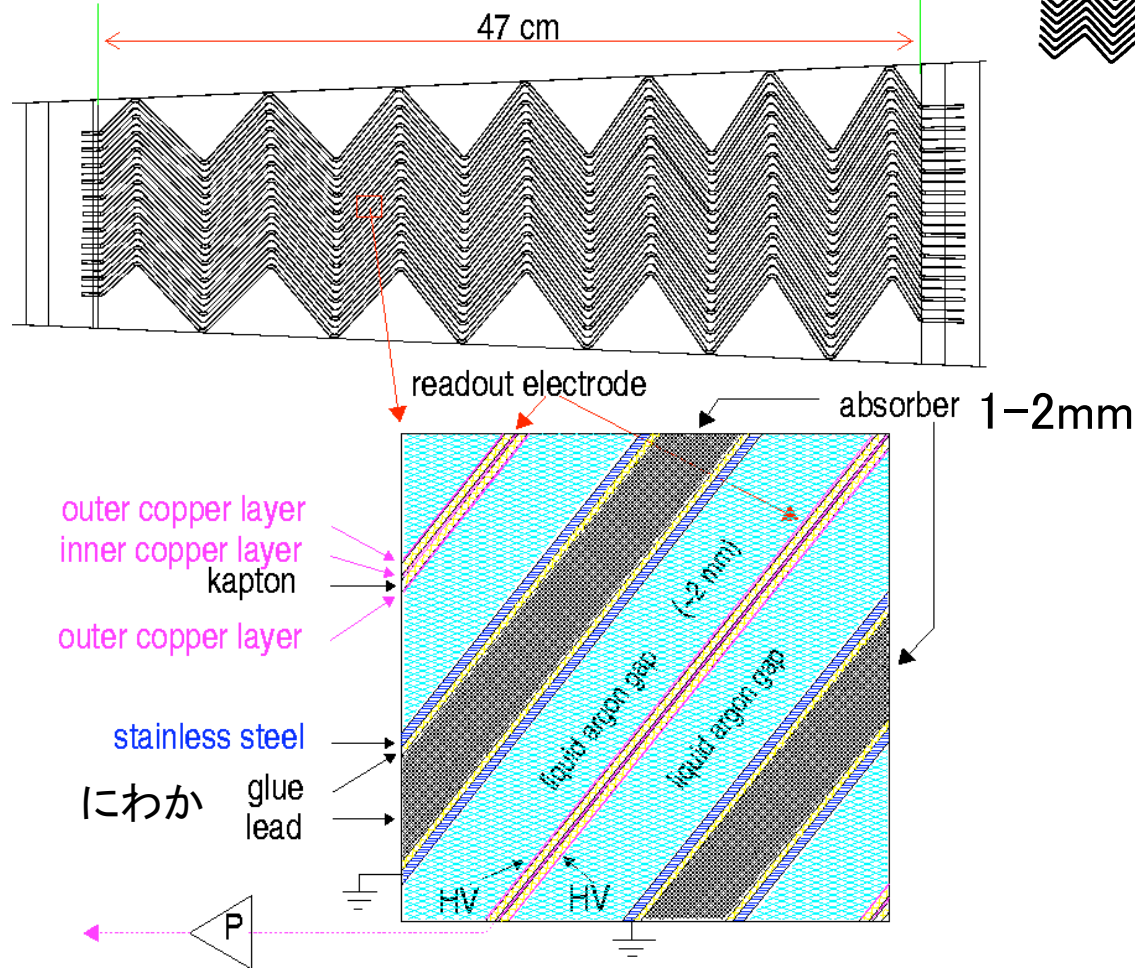
Molière radius



Logで大きくなる

$X_0 = 1.5 \text{ cm}$

EM



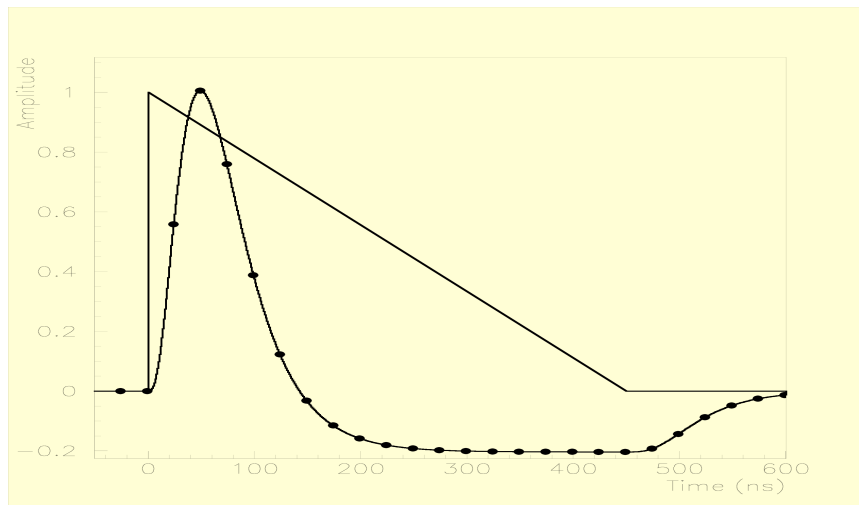
η で細かくセグメント
不感層がない

90Kの液体アルゴン(1 GeV→5M個の電子)

放射線に強い

このままでは、駄目

Drift速度 $5\text{mm}/\mu\text{s}$ $d=2\text{mm}$ なので $400\text{nsec} > 25\text{nsec}$
40nsecの立ち上がりの bipole信号に変換



Noise、Pileup (+-両方のenergy) もあるので、THSの設定は難しい
(SUSYはあんまり関係ないかも知れない。

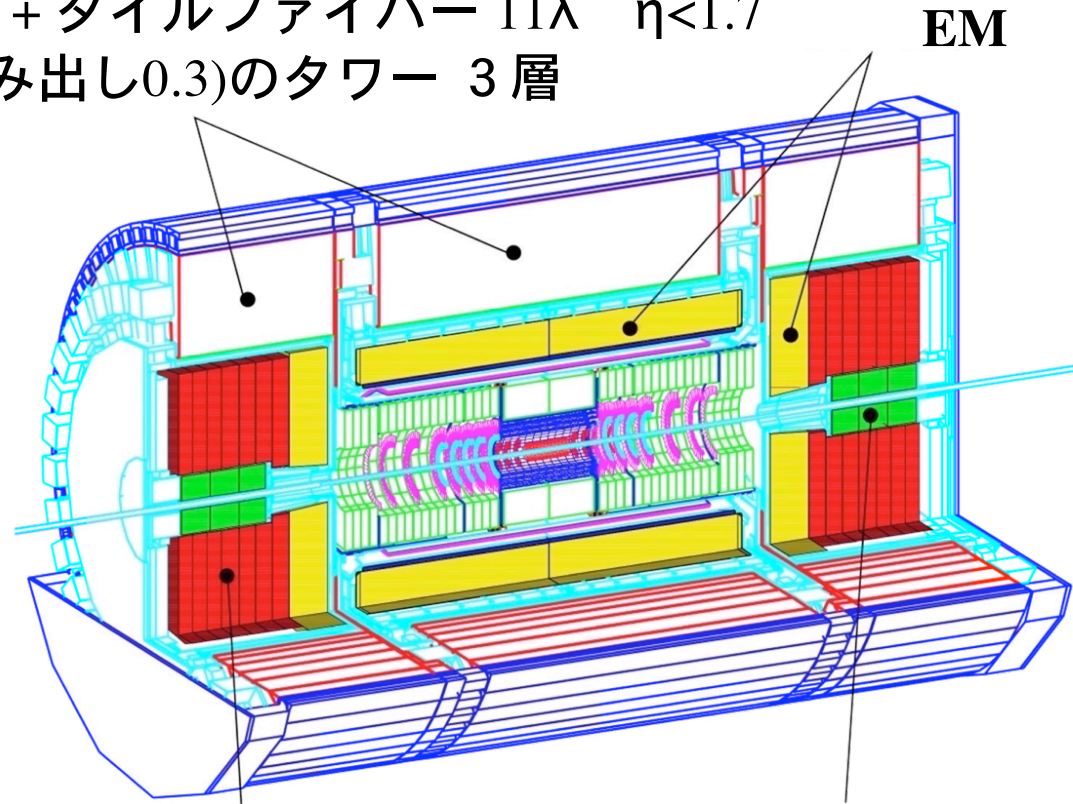
SUSYは、Jet base に tower 補正したもの？

——> General toolは難しい。

SUSYに特化したtoolの開発が大切。

Hcal

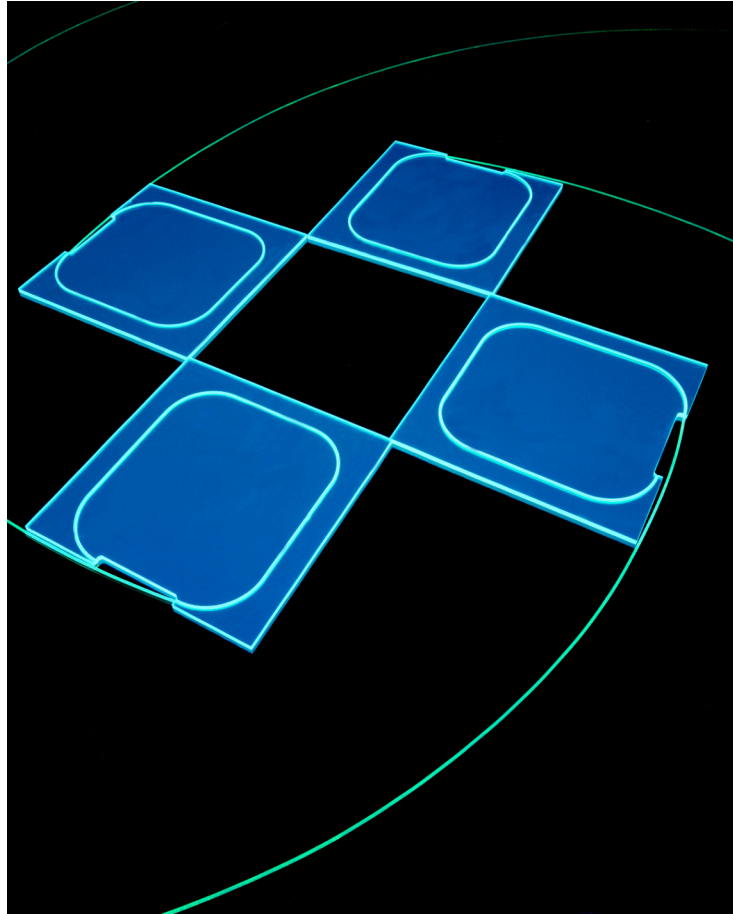
- バレル Fe + タイルファイバー 11λ $\eta < 1.7$
0.1*0.1 (読み出し0.3)のタワー 3層



- エンドキャップ Cu + L.Ar 14λ $\eta = 1.5-3.2$
0.1*0.1 for < 2.5 , 0.2*0.2 for 2.5-3.2 4層

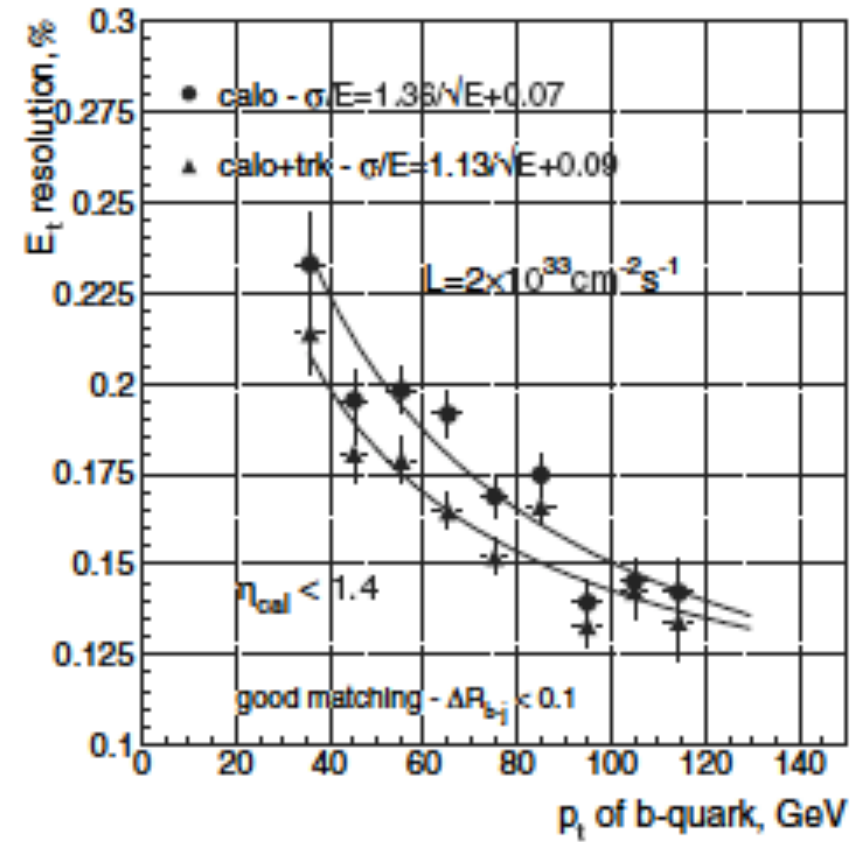
- Forward Cu+W+W 3層 +
L.Ar 0.5mmギャップ 10λ
 $\eta = 3.1-4.9$ 0.2*0.2

→ EMと合わせて、かなり複雑なバリエーション: → 真面目にやるしかない



プラスチックシンチでひかり

Single pi 65%/SQRT(E)+5%



(3-2B) Trigger efficiency Trigger はredundanか？

Table 13-10 LVL1 trigger menu with rates for a luminosity of $2 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

LVL1 signature	Rate (kHz)
EM251	12.0
2EM151	4.0
MU20	0.8
2MU6	0.2
J200	0.2
3J90	0.2
4J65	0.2
J60+XE60	0.4
TAU251+XE30	2.0
MU10+EM151	0.1
Others (prescaled, exclusive, monitor, calibration)	5.0
Total	-25.0

Table 13-11 HLT trigger menu with rates for a luminosity of $2 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

HLT signature	Rate (Hz)
e251	40
2e151	< 1
γ 601	25
2 γ 201	2
μ 201	40
2 μ 10	10
J400	10
3J165	10
4J110	10
J70+xE70	20
τ 351+xE45	5
2 μ 6 with vertex, decay-length and mass cuts (J/ψ , ψ' , B)	10
Others (prescaled, exclusive, monitor, calibration)	20
Total	~200

Trigger menuのチェック missing channelはひとつだけ

(3-3) ExcessはSUSY起源？

期待されるevent topologyは、

multi leptons
 $E_T + \text{High } P_T \text{ jets} + \text{b-jets}$
T-jets

BGの状況や信用度(systematic error)が異なる状況で、それぞれのtopologyでexcessが見えるか？ その比率や分布があるSUSY (msugra) の特別な点の予言と一致するか？

一つのtopologyでしか見えない excessは信用出来ない。
EW sector strong sectorでconsistentか？ Stop/sbottomの効果？

例えば $M_{\text{susy}}=1\text{TeV}$ の分布を見してみる。 M_{sugra} の特徴的な分布はないか？

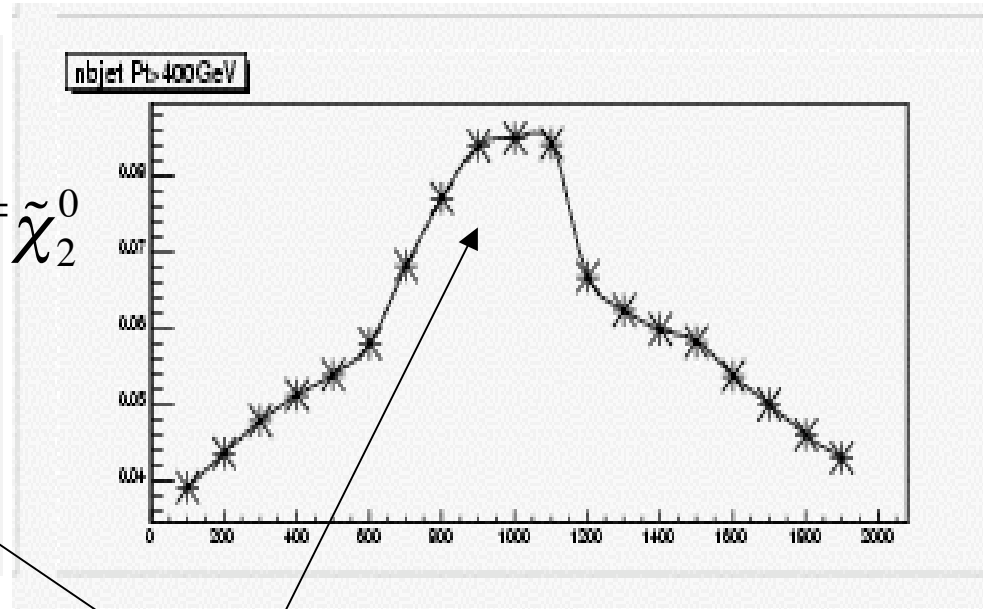
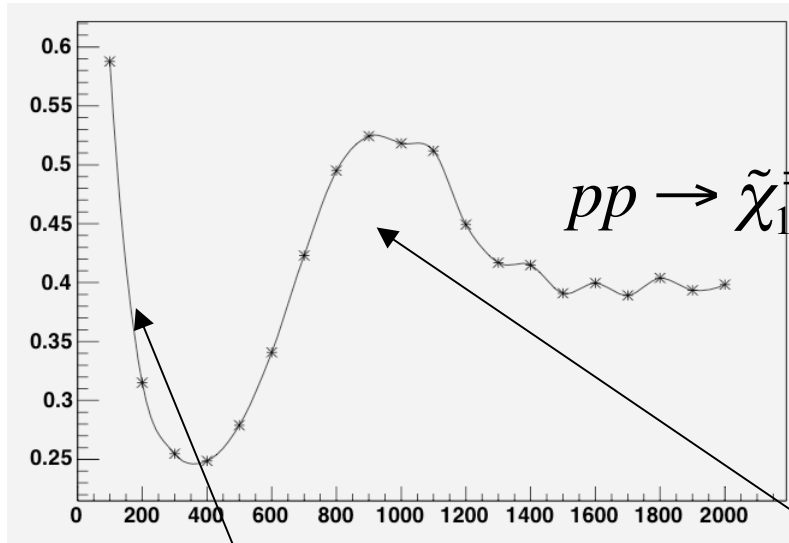
決定的な分布がない。(あるといいけど、、これは今から考えていかないといけない)

→ いろいろな分布のconsistencyをみるしかない。

$M_{\text{susy}}=1\text{TeV}, \tan\beta=10$

$N(\text{with one Lepton})/N(\text{no Lepton})$

$\langle N_{\text{bjet}}(P_t > 400\text{GeV}) \rangle$



$m_0(\text{GeV})$

$m_0(\text{GeV})$

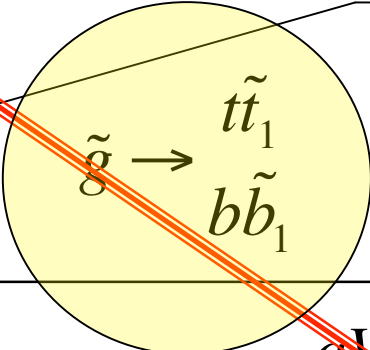
$$\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{l}l, \tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow \tilde{l}\nu$$

$$\tilde{g} \rightarrow t\tilde{t}_1 \rightarrow bbW^\pm \tilde{\chi}_1^\pm$$

We can measure these values with inclusive study \rightarrow give information about m_0 .

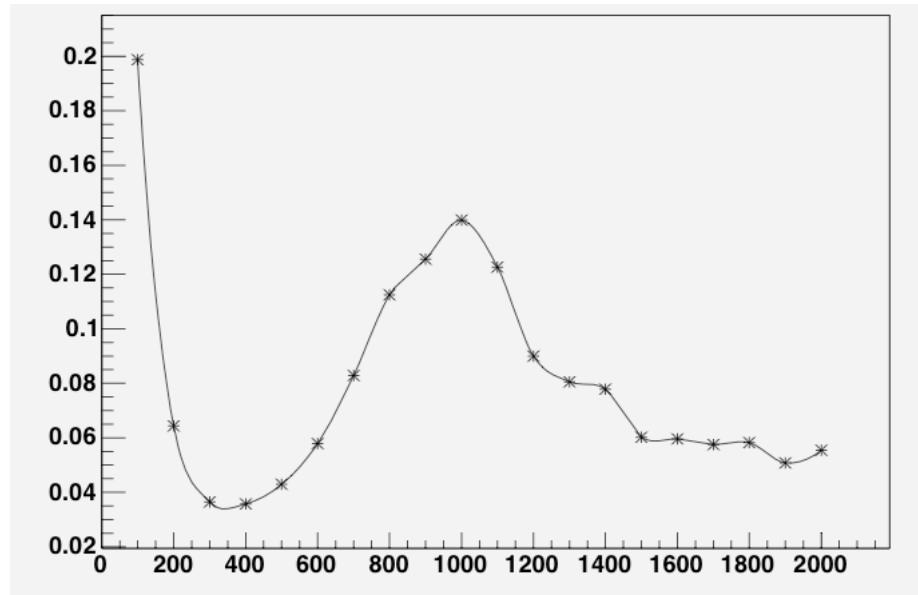
Large m_0

	$m(\tilde{g}) < m(\tilde{q})$	$m(\tilde{g}) \approx m(\tilde{q})$	$m(\tilde{g}) > m(\tilde{q})$
\tilde{g}	$q\bar{q}\tilde{B}^0 (\approx 1)$ $\tilde{g} \rightarrow q\bar{q}\tilde{W}^0 (\approx 2)$ $q\bar{q}\tilde{W}^\pm (\approx 4)$	$\tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}$	
\tilde{q}_L	$\tilde{q}_L \rightarrow q\tilde{g}$	$\tilde{q}_L \rightarrow q\tilde{W}^0 (\approx 1)$ $q\tilde{W}^\pm (\approx 2)$	
\tilde{q}_R	$\tilde{q}_R \rightarrow q\tilde{g}$	$\tilde{q}_R \rightarrow q\tilde{B}^0$	



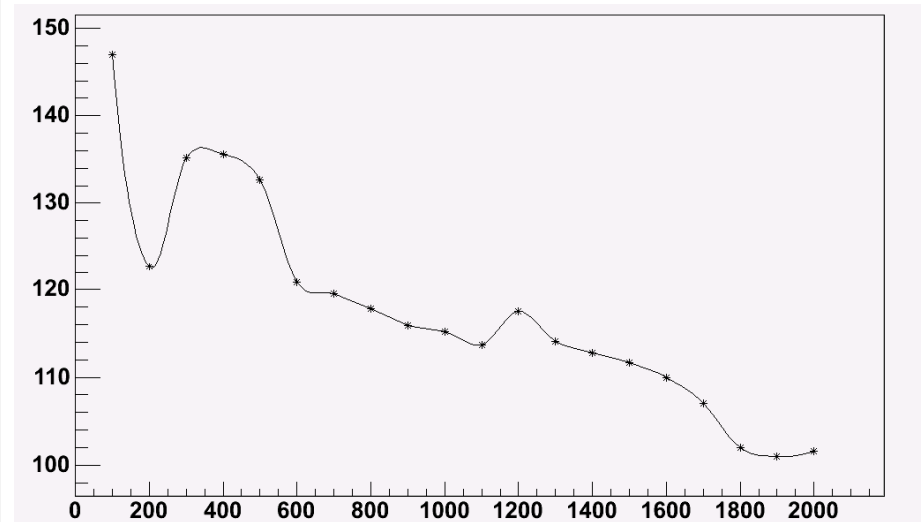
Small m_0 ₄₃

$N(2\text{lepton})/N(\text{No lepton})$



$m_0(\text{GeV})$

$\langle Pt \text{ of lepton pair system} \rangle$



$m_0(\text{GeV})$

Number of event including two lepton is enhanced by stop and slepton.

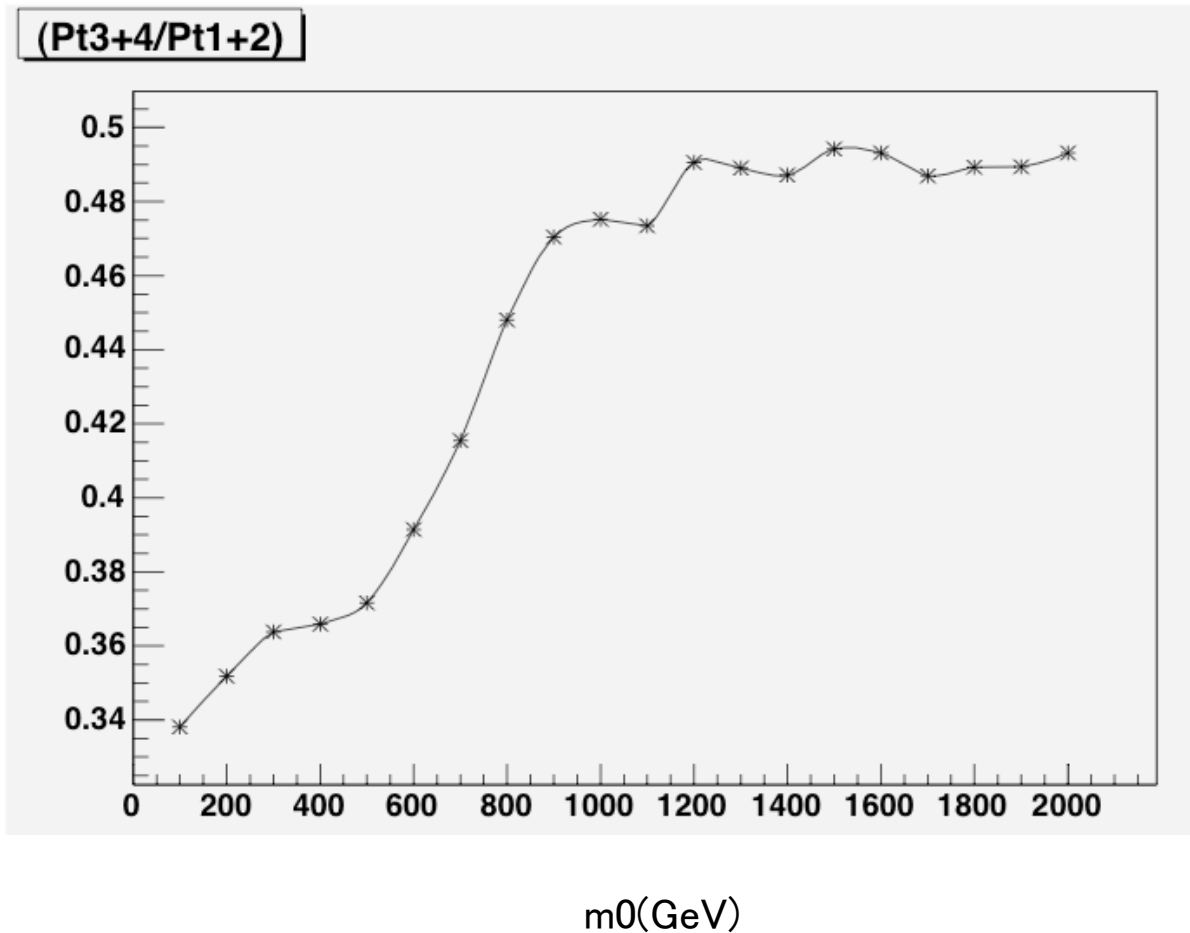
Same structure except for gaugino direct production.

Momentum of two lepton carry information

About mass difference between N_1 and N_2

$=0.4m_1/2$ ほぼ一定

Ratio of Sum pf Pt of 3rd and 4th jet over
Sum of pt of 1st and 2nd pt jet.



If $m_0 > 1000 \text{ GeV}$ signal looks like 4jet-like

If m_0 is small, squark production is dominate, and 2jet-like topologies are expected.

We can determine m_0 and perform consistency check for the excess is msugra or not? ⁴⁵

mSugraかどうか？

モデルやパラメーターのだいたいの領域を
上手に見分ける分布やvariable の開発し、
様々なSUSY model のデータベース化 (FAST)

使う道具の開発や例え開発しなくても、
重要なuserとなるだけでも大切 (Full)

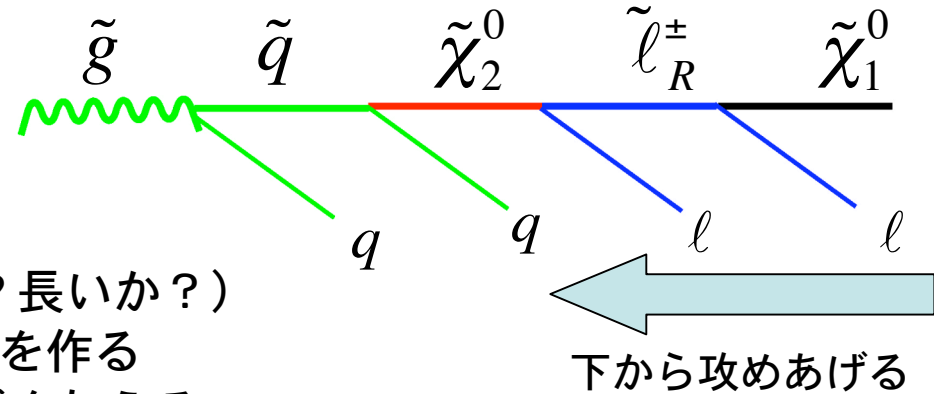
-> B-tag, tau-tag,

——> こうやって、観測されたものが mSugra(mGM)のある点と
Consistentだったら、安心して次のstepに進める。

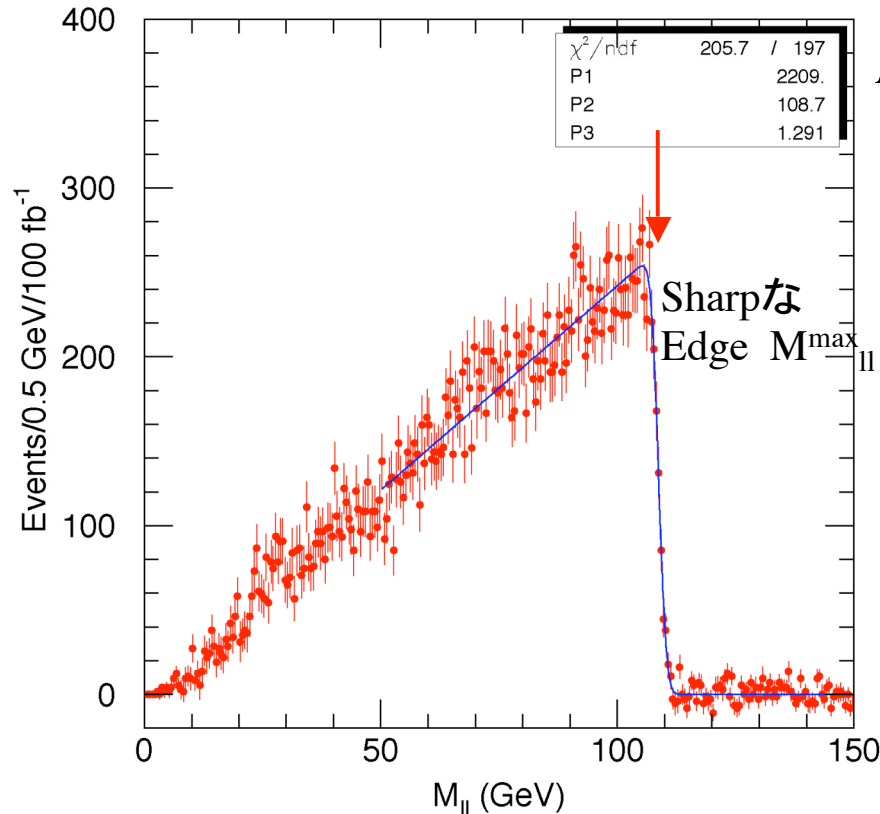
--> endpoint使った kinematic の再構成

Lも必要だし、BG(SM, SUSY)の理解も 2010年以降でしょう。

質量の再構成に関して



1. 適当なdecay chainを選ぶ (key point!)
(綺麗か? 他のSUSY Decay chain? 長いか?)
2. mass や P_T などのkinematic distributionを作る
3. Edgeやendpointからmassの関係に束縛を与える



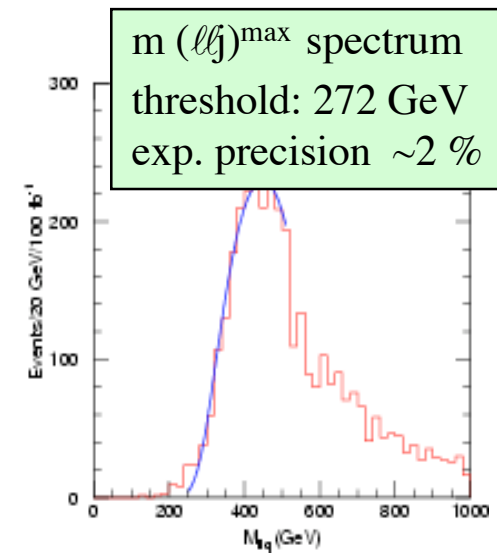
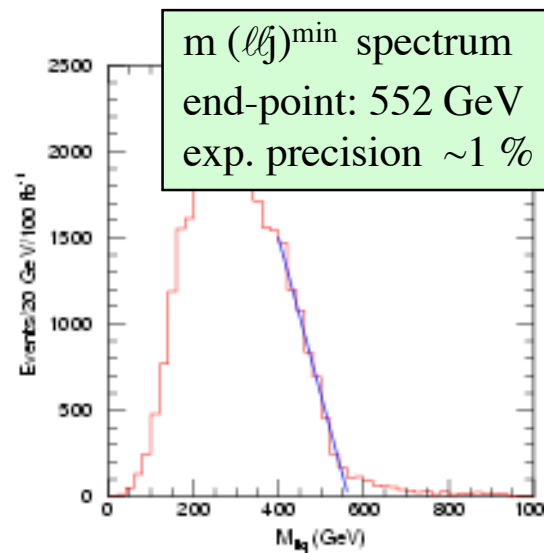
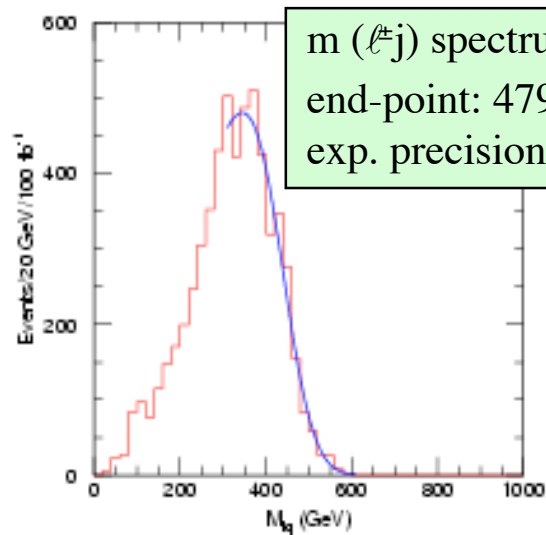
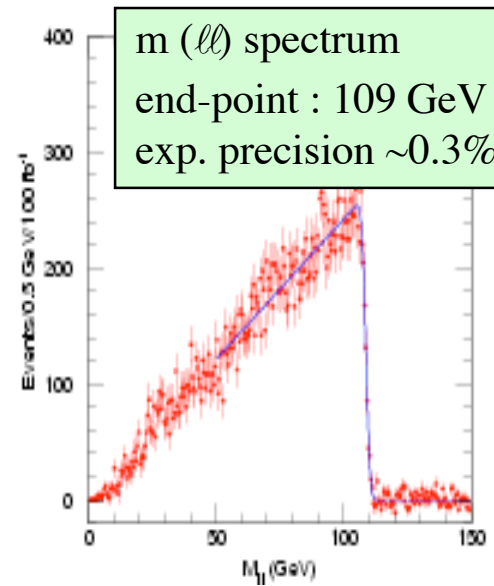
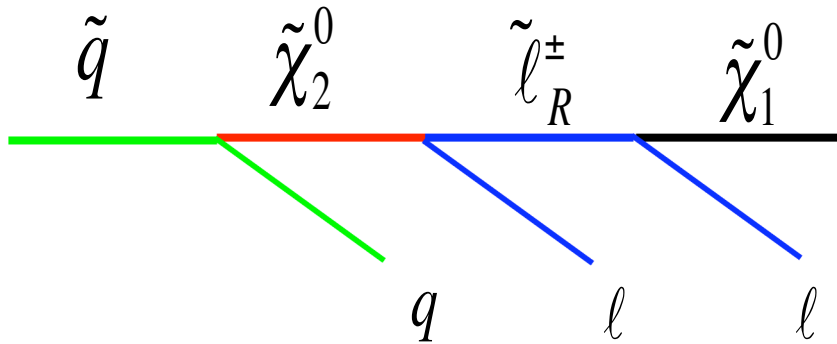
$$M_{\ell\ell}^{\max} = m(\tilde{\chi}_2^0) \sqrt{1 - \left(\frac{m(\tilde{\ell}_R^\pm)}{m(\tilde{\chi}_2^0)}\right)^2} \sqrt{1 - \left(\frac{m(\tilde{\chi}_1^0)}{m(\tilde{\ell}_R^\pm)}\right)^2}$$

- 一般に関係式の方が未知数 (質量) より少ない。Modelの助けを借りて Massの絶対値を決める。
- 発見と違って、model依存性が強い
モデル依存度は、★★★★

でも、モデルさえあってれば 約5%の精度でDMの質量決定出来る。

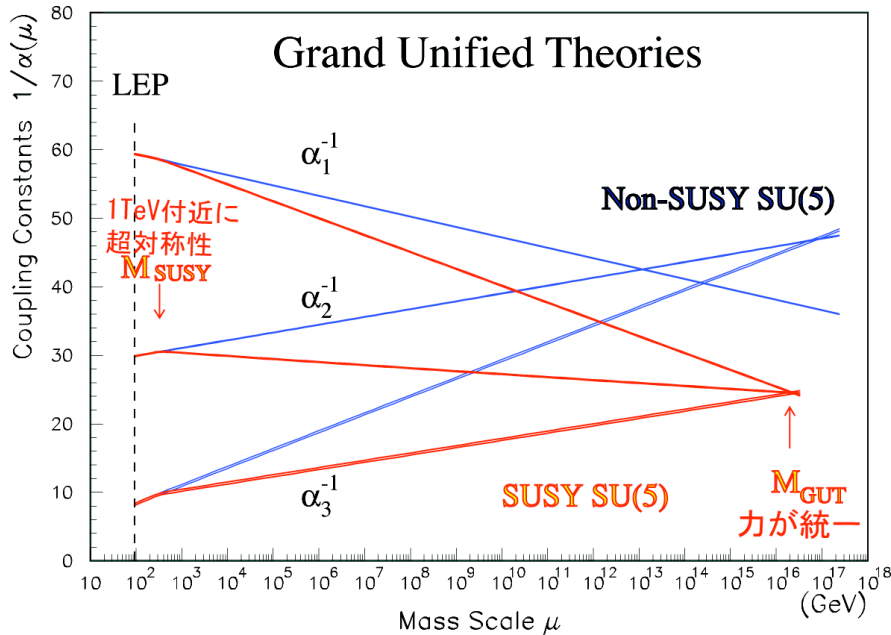
運が良くて、2 Body decay chainがあったら、
モデルの過程なしに質量が決定できる。

登場人物 4 人



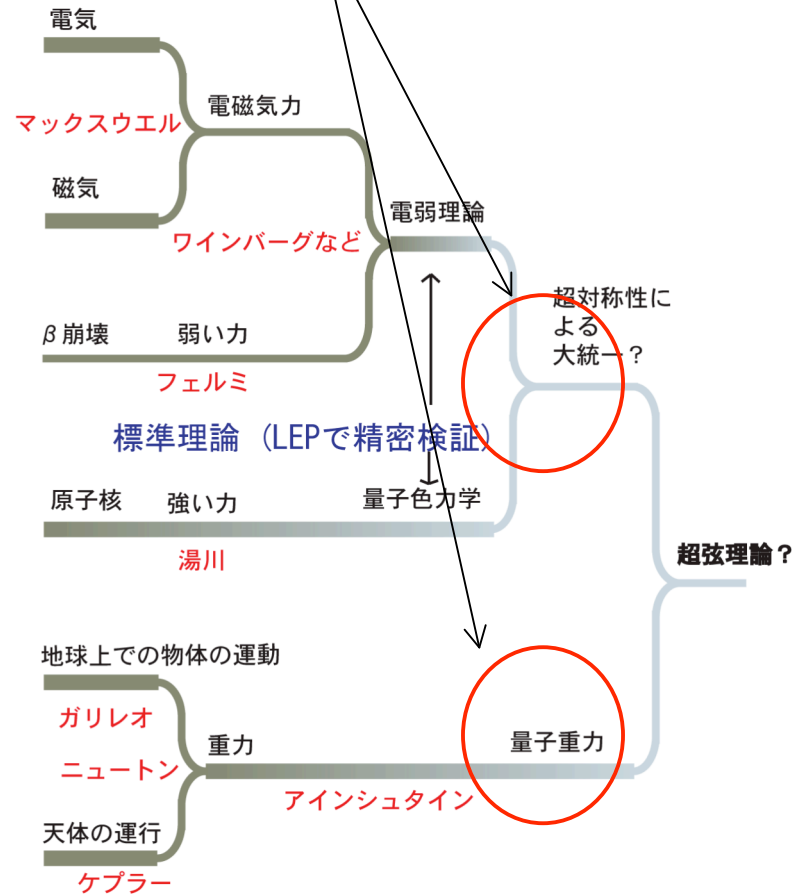
4未知数 vs 4条件 \rightarrow model independentにmassが決まる。(3-12%程度
for 700-800 GeV squark, gluino)

いいこといっぱい SUSY



でも、見えていない!!!

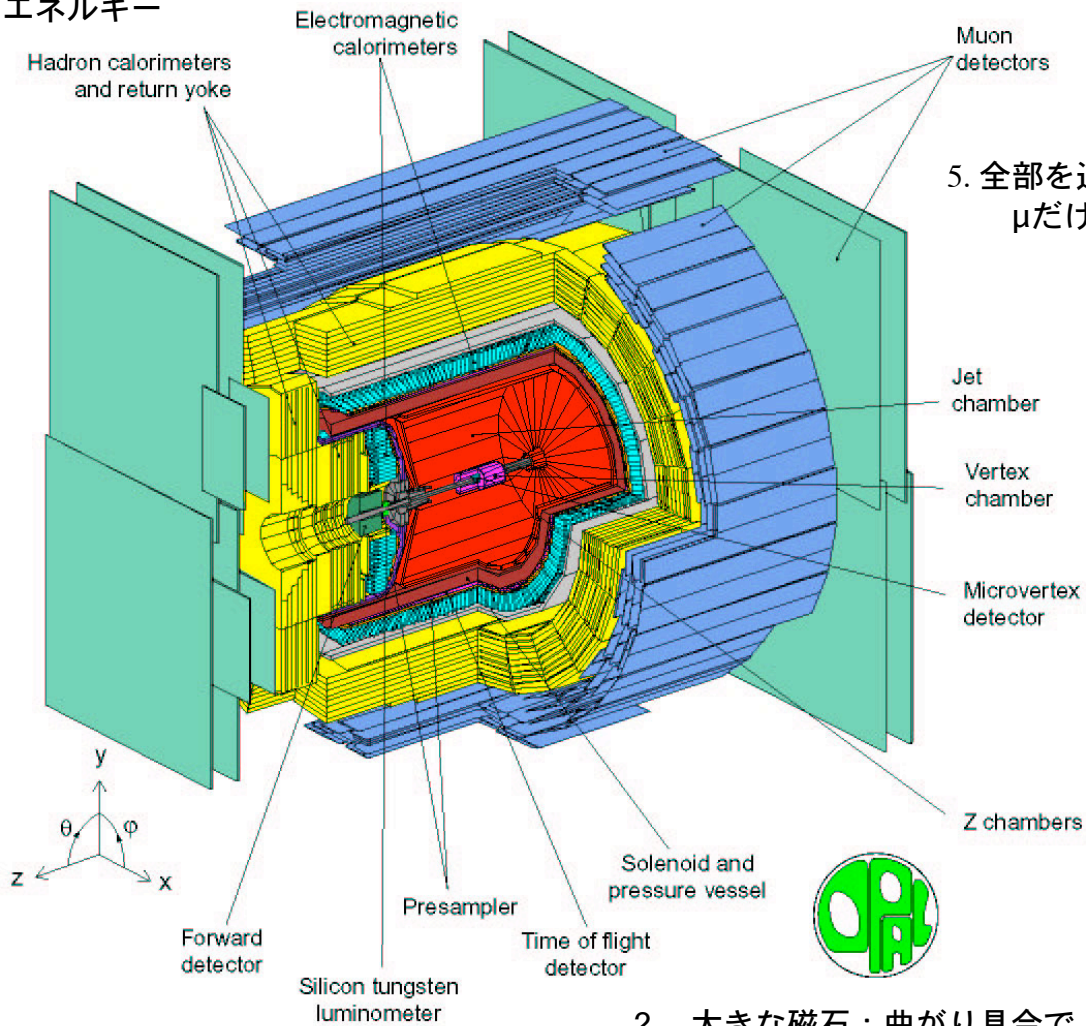
超対称性は、で重要な働きをする。



OPAL検出器

4. Feとチェンバーで
ハドロンエネルギー

3. 鉛のに入ったガラス：シャワーが起こる
電子、光子のエネルギー測定

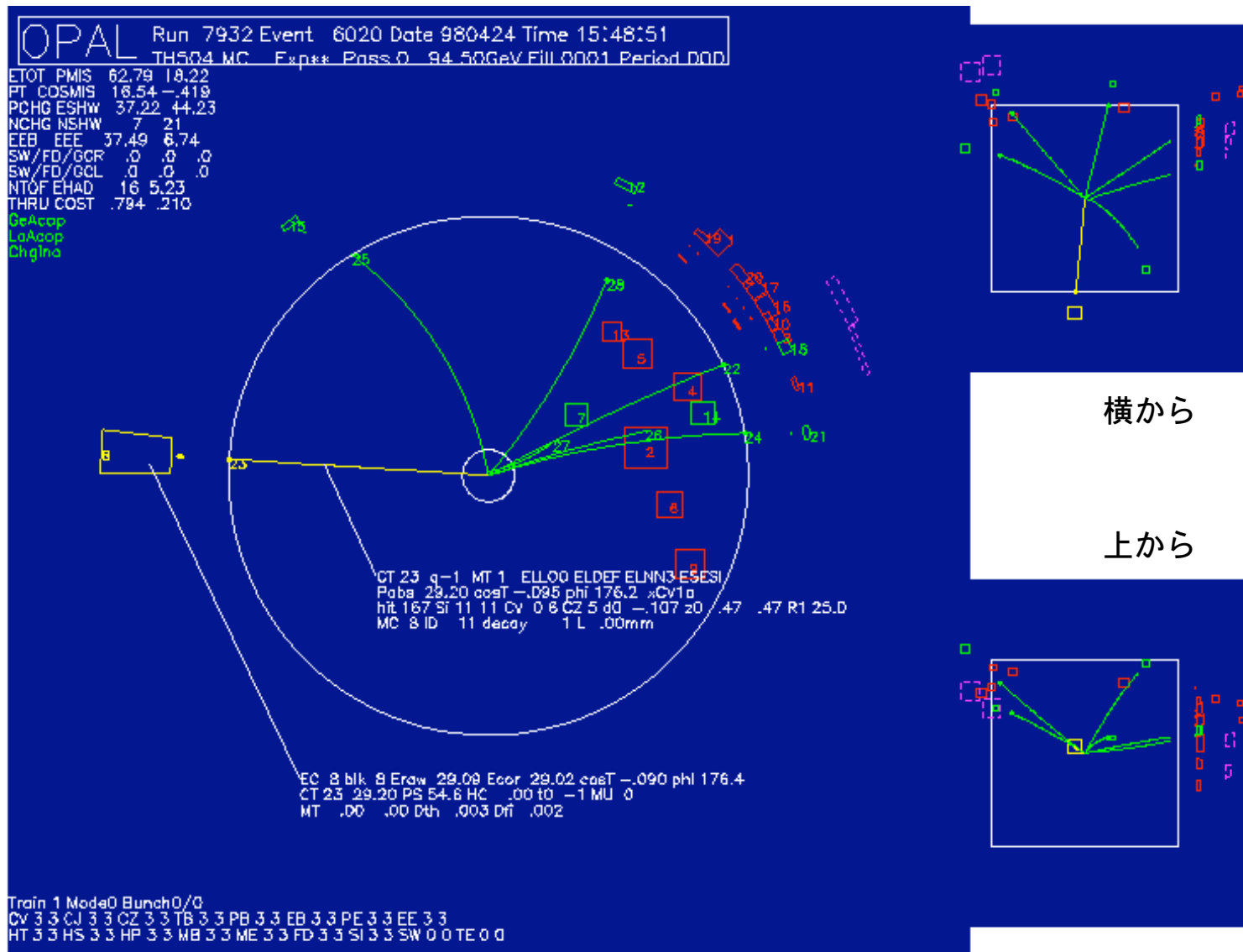


5. 全部を通り抜ける粒子は
 μ だけ (ν も)

1. Gasが入っていて荷電粒子が
通ると飛跡が見える。これを
高い電圧かけて集めて読む

2. 大きな磁石：曲がり具合で
運動量がわかる。

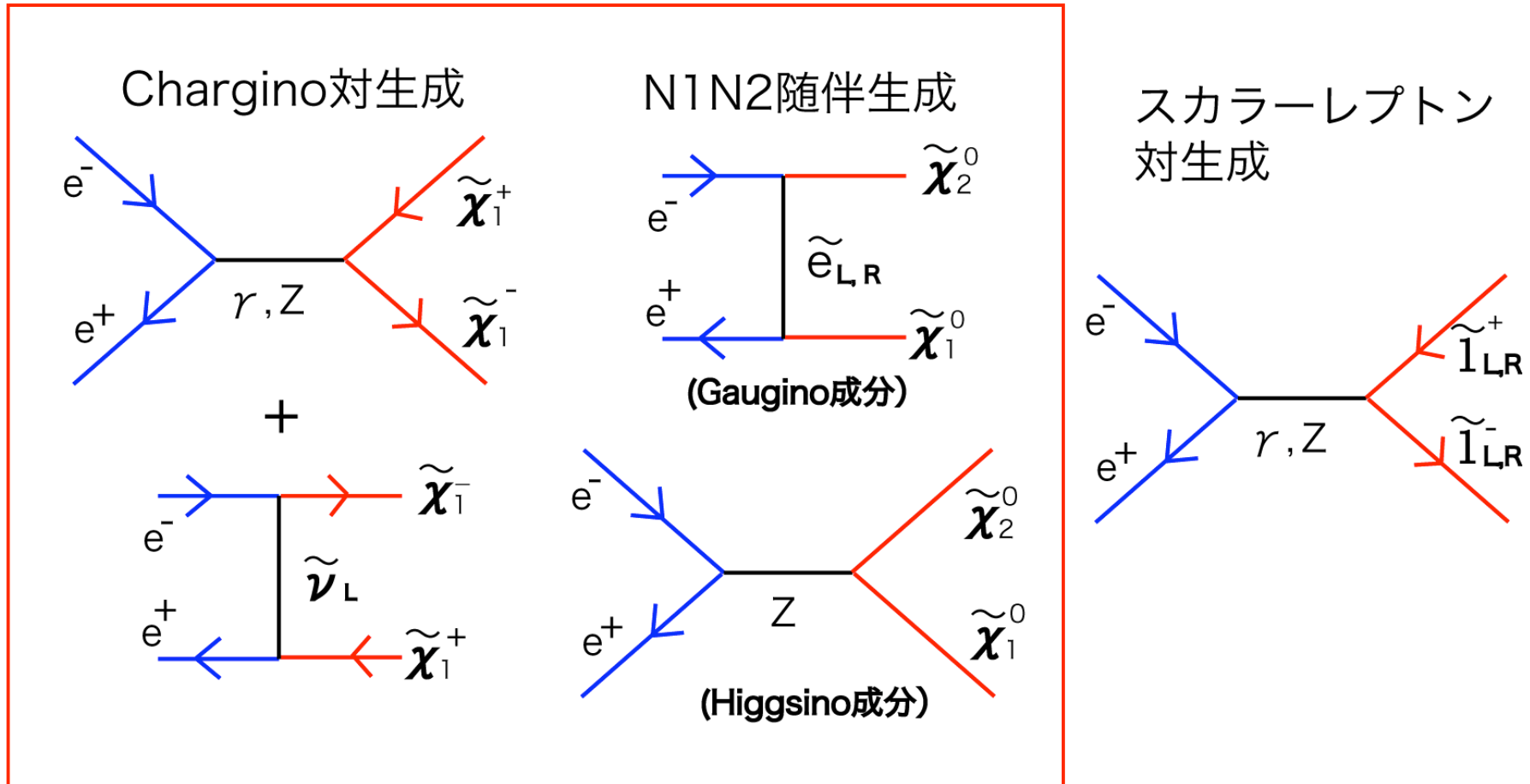
どんな風に見える？



こんな感じのイベントが約1Hzで収集、 電子、ハドロン（パイ）、 γ 、全体に大きなmissing E 51

LEPで探すSUSY過程

$e^+e^- \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 \tilde{\chi}_1^0$ は、観測出来ない (両方Dark) ので、以下の2つが大切



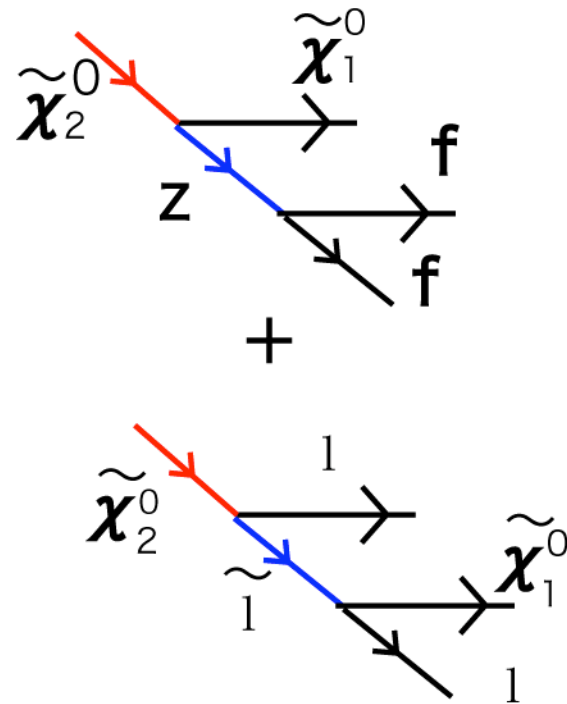
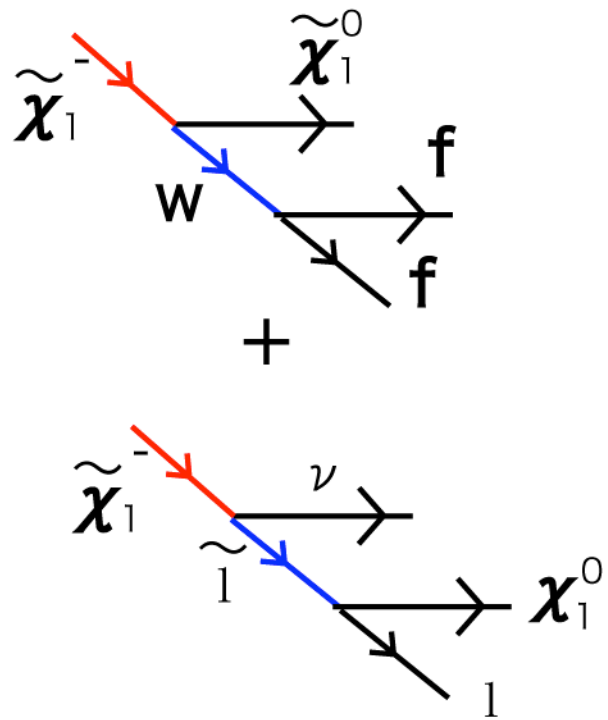
sとtはnegative interference
Sleptonが軽いと σ が現象

生成断面積は、スカラーレプトンの性質に依存する →

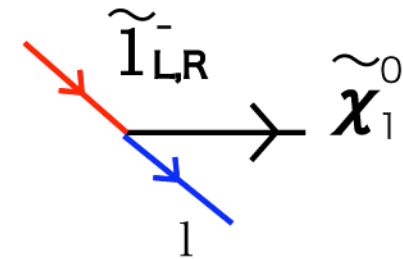
LEPで探すSUSY過程

生成したchargino/neutralino/scalar leptonは、すぐに崩壊する。
 ここでもスカラーレプトンの質量が大切

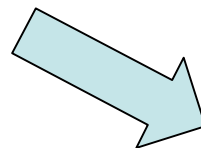
Chargino崩壊過程 neutralino2 崩壊過程



スカラーレプトン崩壊過程

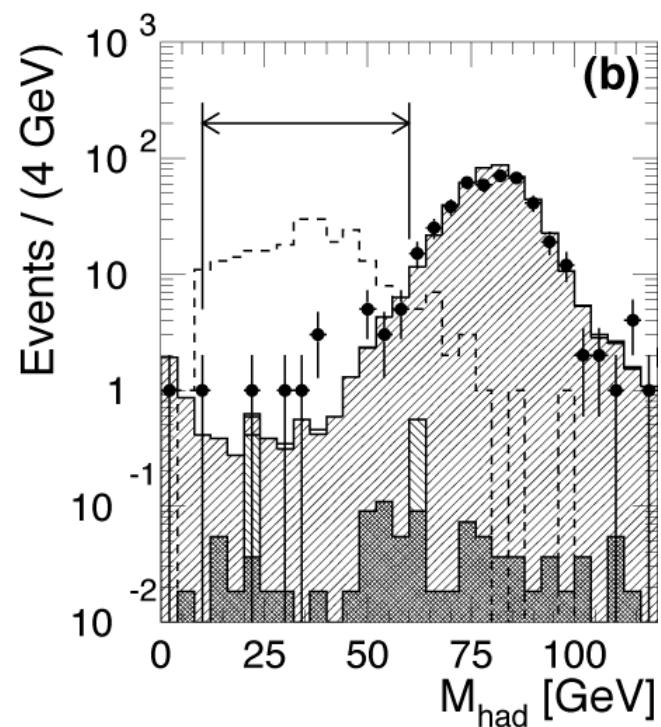
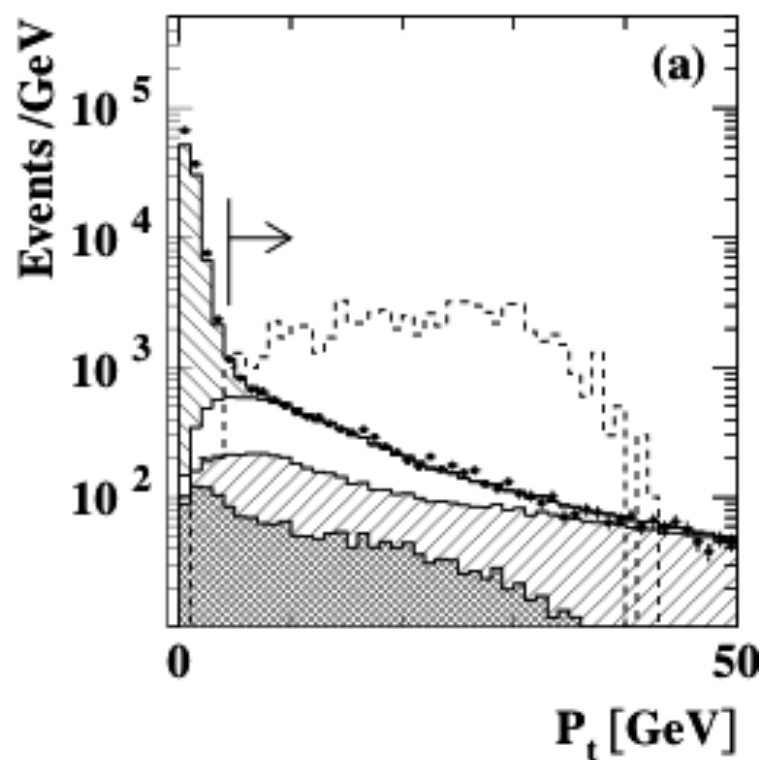


Scalar leptonが軽いとlepton終状態が増加する。



全ての組み合わせ（トポロジー）を探索

観測されたデータは、バックグラウンド（標準理論の予言する）と一致している。例として、



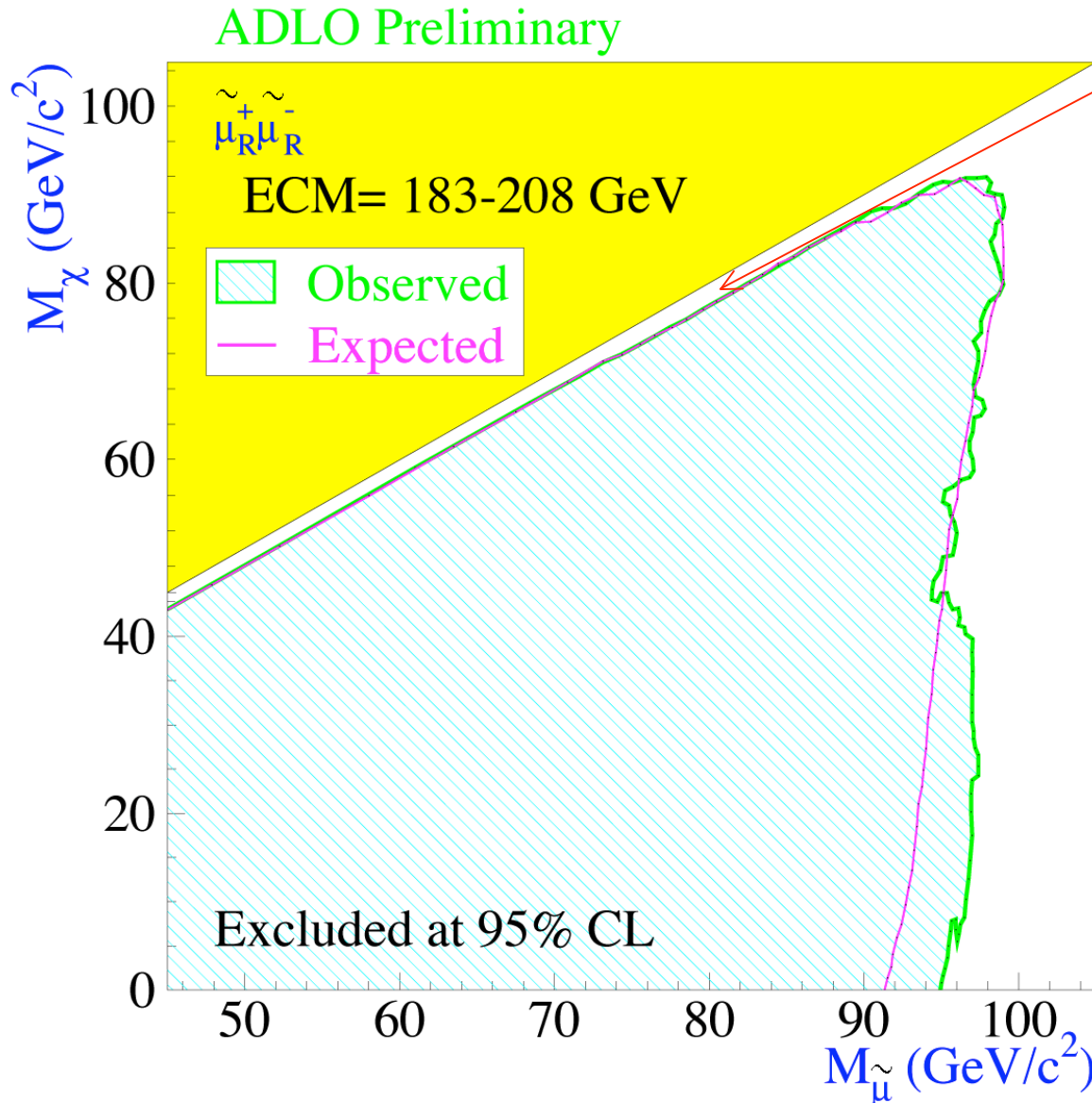
Beam軸に垂直な方向のアンバランス
信号はN1が逃げるので大きなアンバランス
バックグラウンド:

$$e^+e^- \rightarrow W^+W^- \rightarrow \ell\nu q\bar{q}'$$

$M(q\bar{q}')$ M_w の所にpeak,
Signalは低い所に出る

全てのトポロジーで
ズレは観測されず。

スカラーレプトンの制限



スカラーレプトンとN1の
質量差がたまたま
小さくなると leptonが
ひよろひよろになって
見えない。

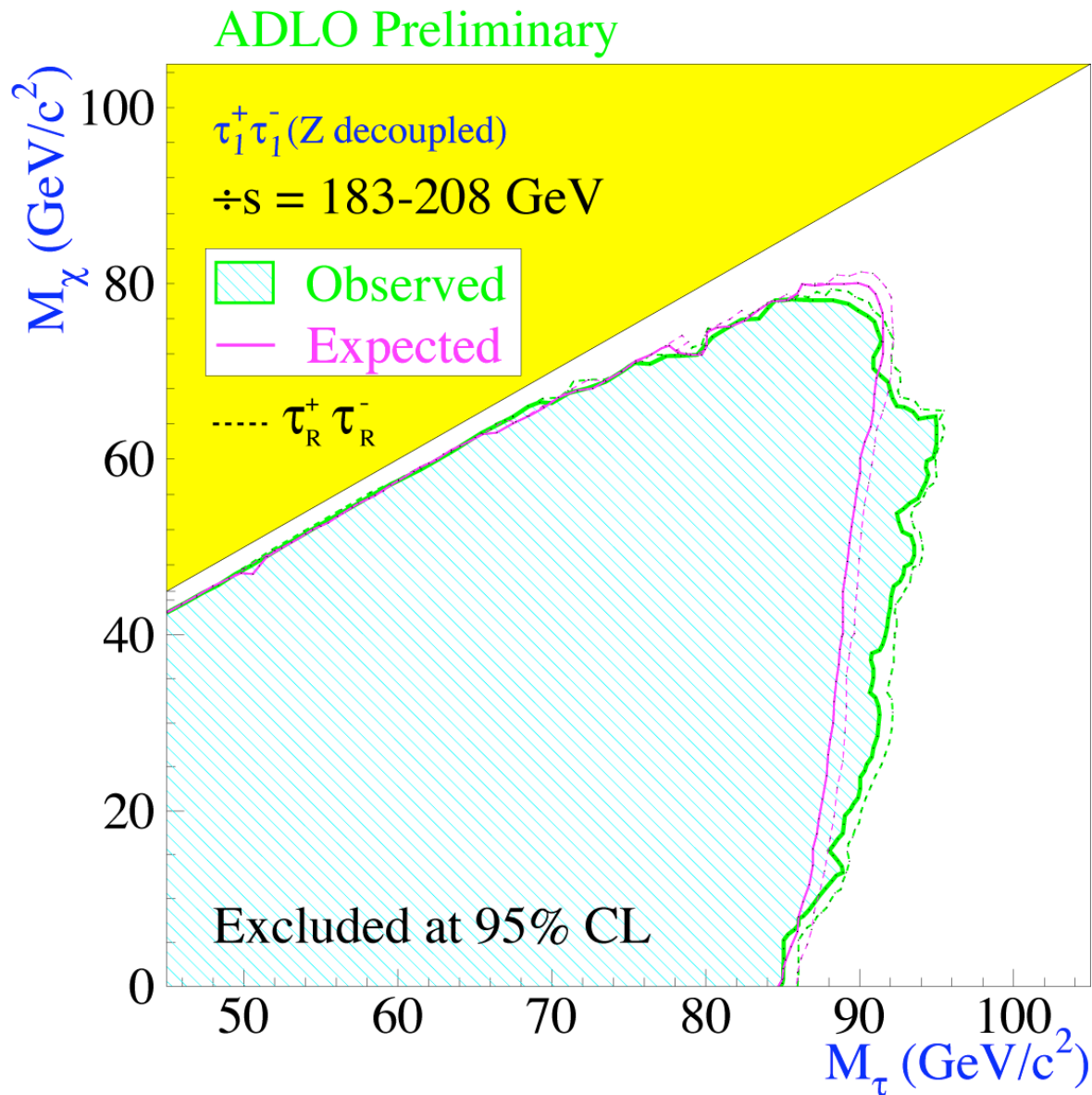
$$\Delta m(= m(\tilde{\ell}^\pm) - m(\tilde{\chi}_1^0)) > 3\text{GeV}$$

$m(\text{scalar lepton}) >$
94-98GeV
 depending on neutralino
 mass

これは、model (1) ★★★
 (2) ★★ で有効。

スカラー τ の制限

τ はmixingの
効果で軽くなる。



τ は崩壊するので
感度が悪くなる

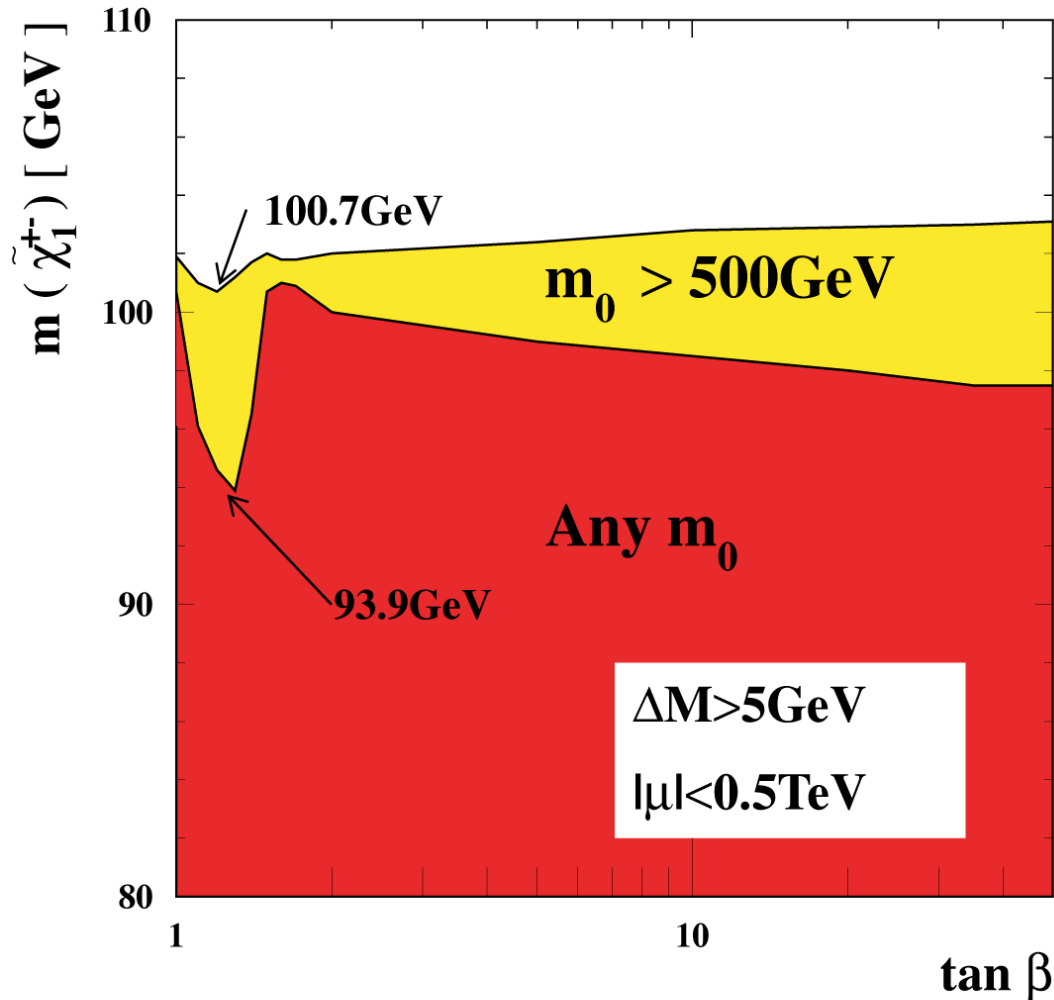
$m(\text{scalar } \tau) >$
85-90 GeV
depending on neutralino
mass

$\tilde{\chi}_1^\pm$ charginoに対する制限

★★★ モデル (2)

Beam energy からの制限103.5GeV
近くまで排除している。

OPAL



細かい話 (1)

$$m^2(\tilde{e}_L) = m_0^2 + 0.52m_{1/2}^2 - 0.27D$$

$$m^2(\tilde{e}_R) = m_0^2 + 0.15m_{1/2}^2 - 0.23D$$

$$m^2(\tilde{\nu}_L) = m_0^2 + 0.52m_{1/2}^2 + 0.50D$$

m_0 が小さいと、スカラーレプトンが軽くなり、干渉項の符号で断面積が小さくなる。(制限が悪くなる)

細かい話 (2)

Model2と言うのはHiggs関係のパラメター μ を自由にしたもの

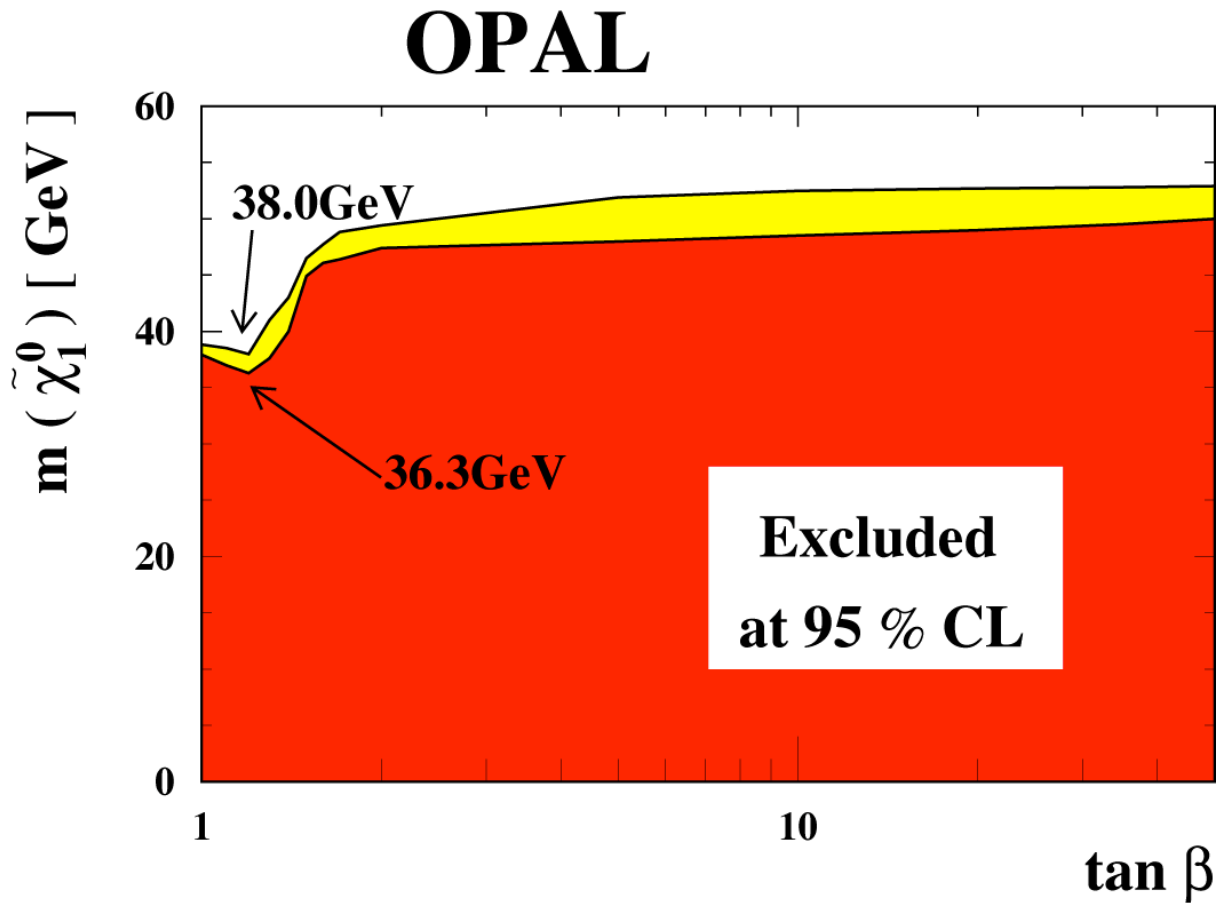


軽いCharginoがHiggsinoになることも可能



この場合、結合がyukawa結合
重い物よくくっつく。
 $\tan \beta$ が大きくなると τ が軽くなり
また制限が悪くなる。

$\tilde{\chi}_1^0$ LSP(DM)に対する制限 ★★ **モデル (2)**



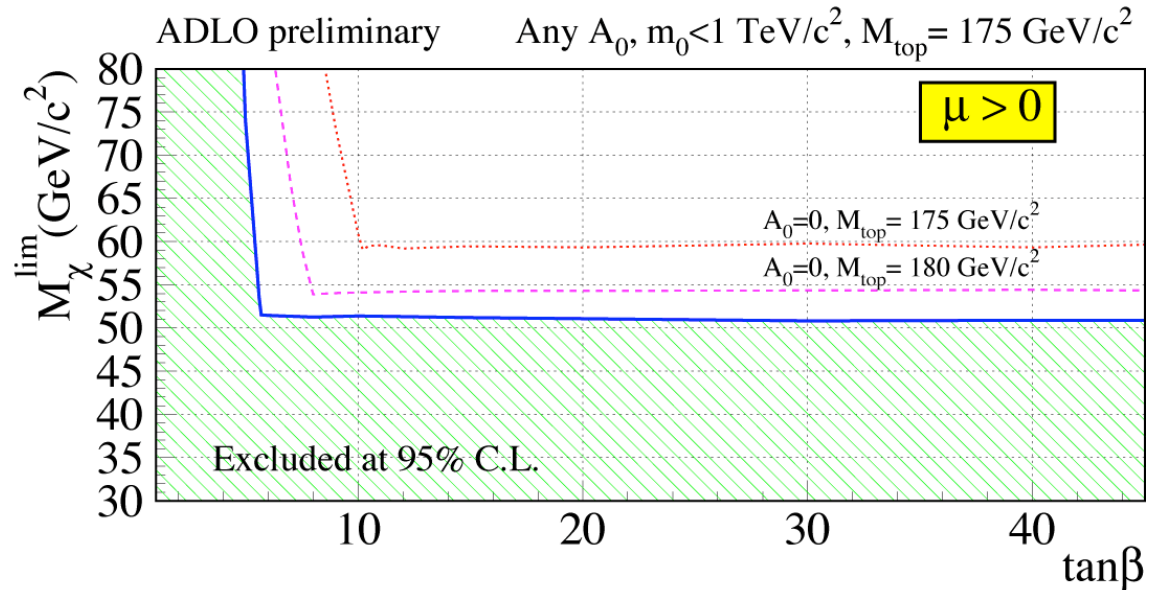
だいたいcharginoの半分の質量



下限は、45 ~ 50 GeV

(赤は m_0 が小さい時、黄色は大きい時)

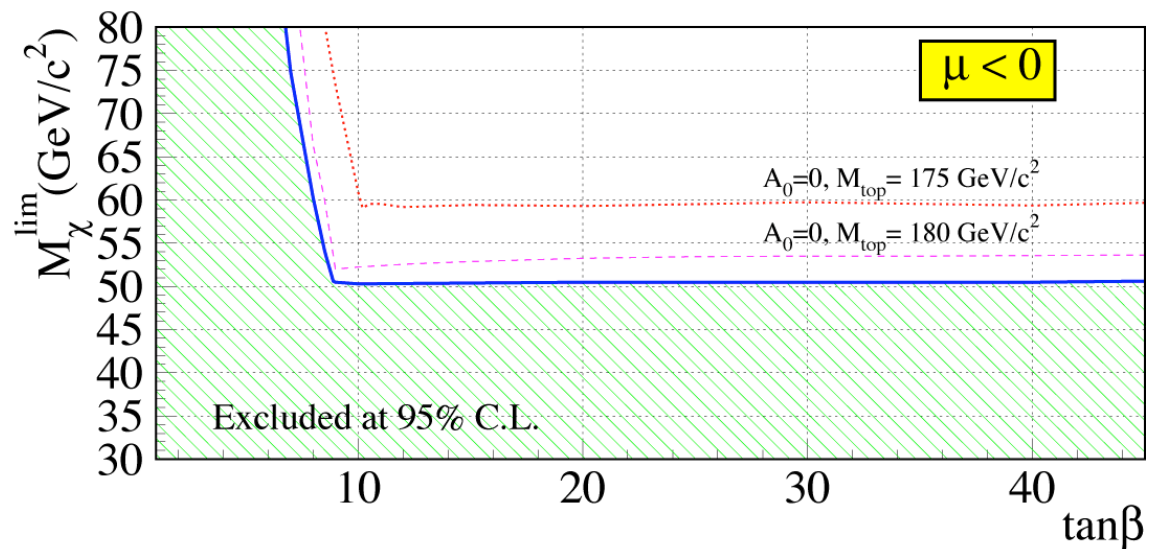
一部悪い所 36GeV
 (μ と M_2 がたまたま似たような値になると、Chargino/neutralinoの質量が縮退してしまい、加速器実験では見えにくい)

$\tilde{\chi}_1^0$ LSP(DM)に対する制限 **モデル (1)**

条件を厳しくした。
更に、ヒッグスの質量についても予言が可能であり、small $\tan\beta$ は、これで否定される。



この場合下限は、**50 GeV**

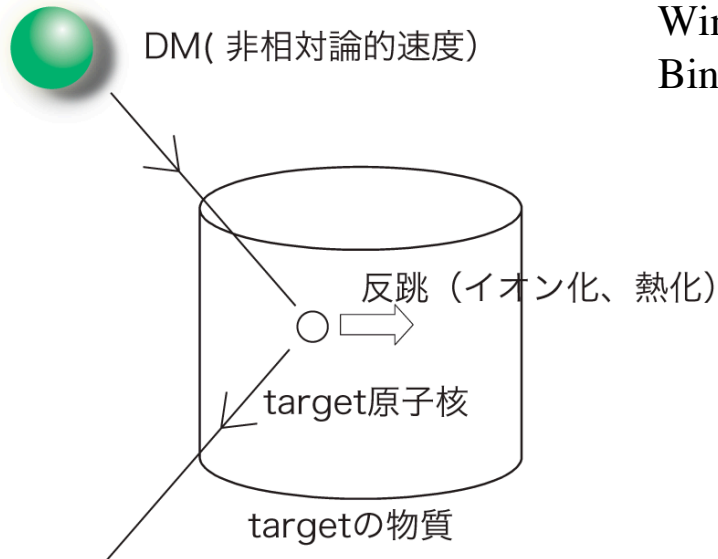


$\tilde{\chi}_1^0$ LSP(DM)に対する制限 の まとめ

モデル (1) mSUGRA ★★★ $m(\tilde{\chi}_1^0) > 50 GeV$

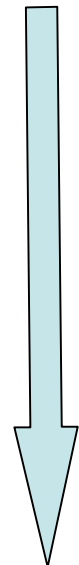
モデル (2) CMSSM ★★ $m(\tilde{\chi}_1^0) > 36 GeV$ (higgsを使ってない)

モデル (3) non universal ★ 全くのnon universalにすると、
 残念ながらLEP だけでは制限が付かない。LEPでは
 N2,C1 を探している。Wino, higgsinoのmassに制限
 を与えている。
 Wino/Bino massに対する関係がないので、
 Bino LSPに対しては無効。(ある程度関係が必要)

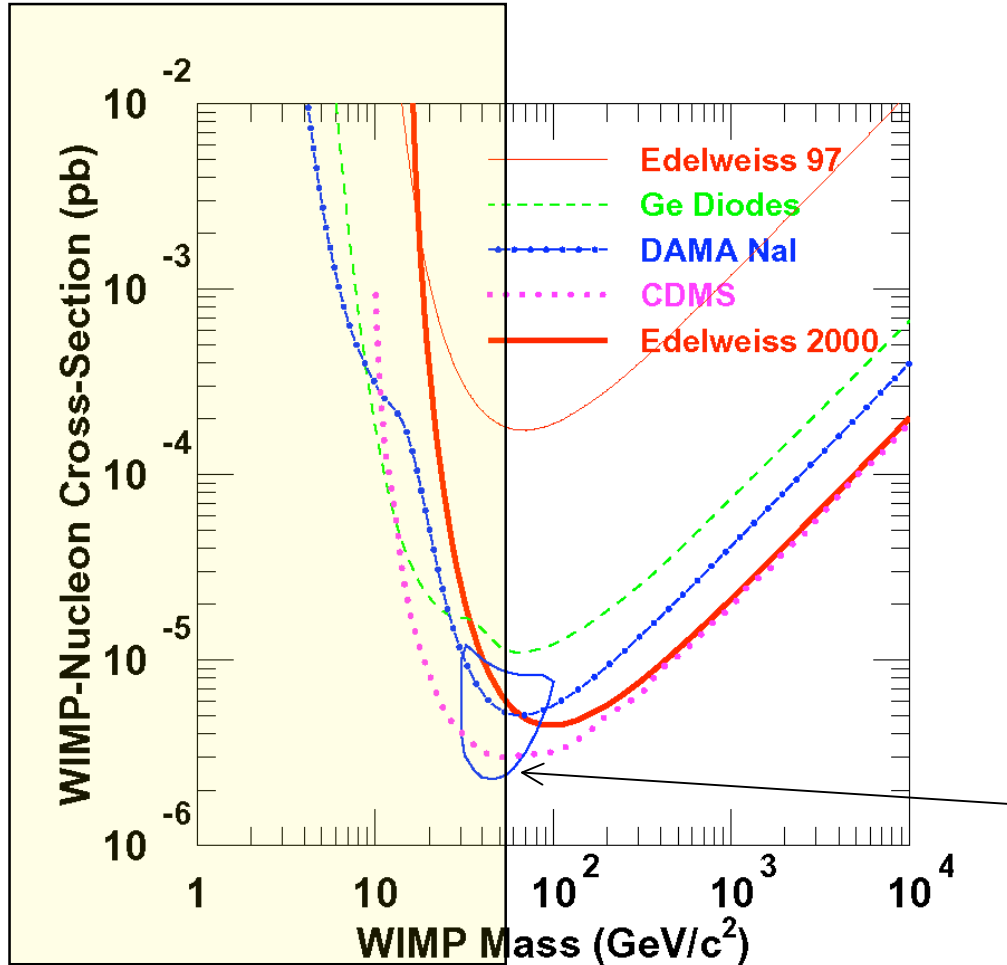


Dark Matterの直接検出に重要な制限

(軽いDMは反跳が小さいので、
 検出が難しくなる)



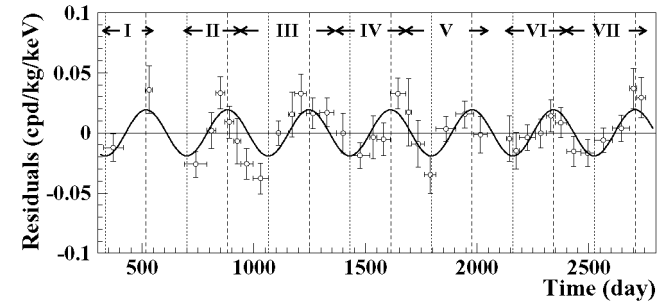
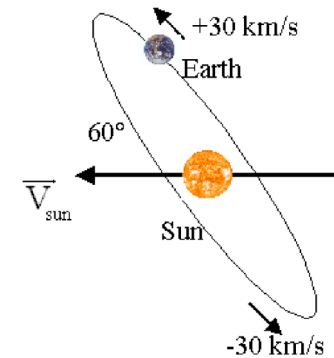
DM直接探索の現状



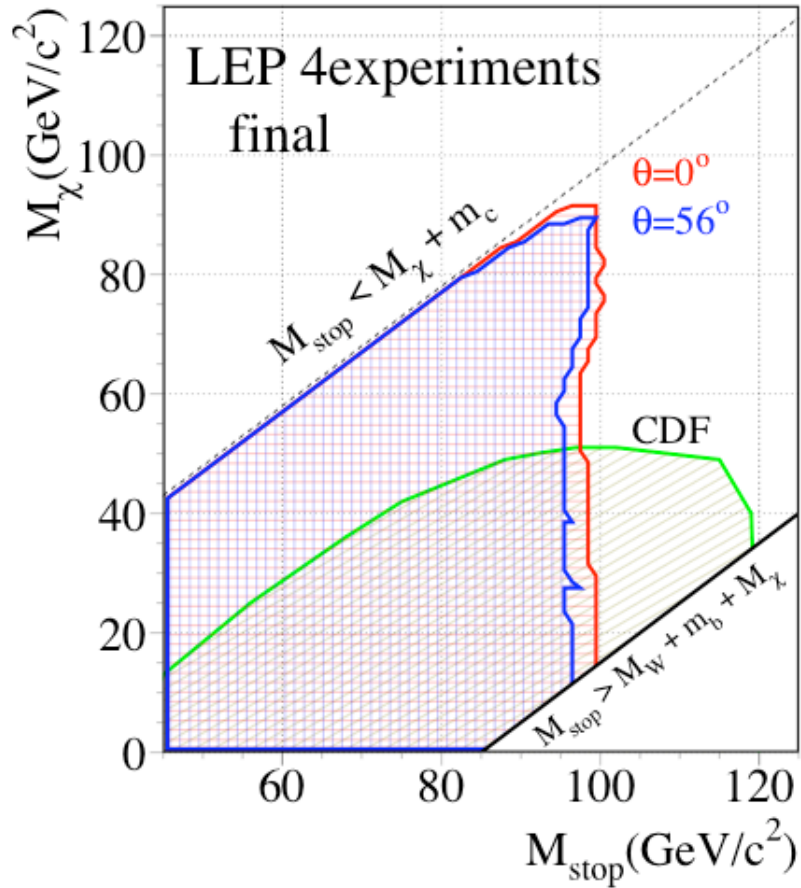
4

- (1) 軽い所は、感度が無いけど
ばっさり、棄却した。
- (2) かなり??ですが、DAMA
と言うNaIを使ったグループが
季節変動を観測
DM?
この領域も相当領域 棄却

Halo に対して
170-270km/s

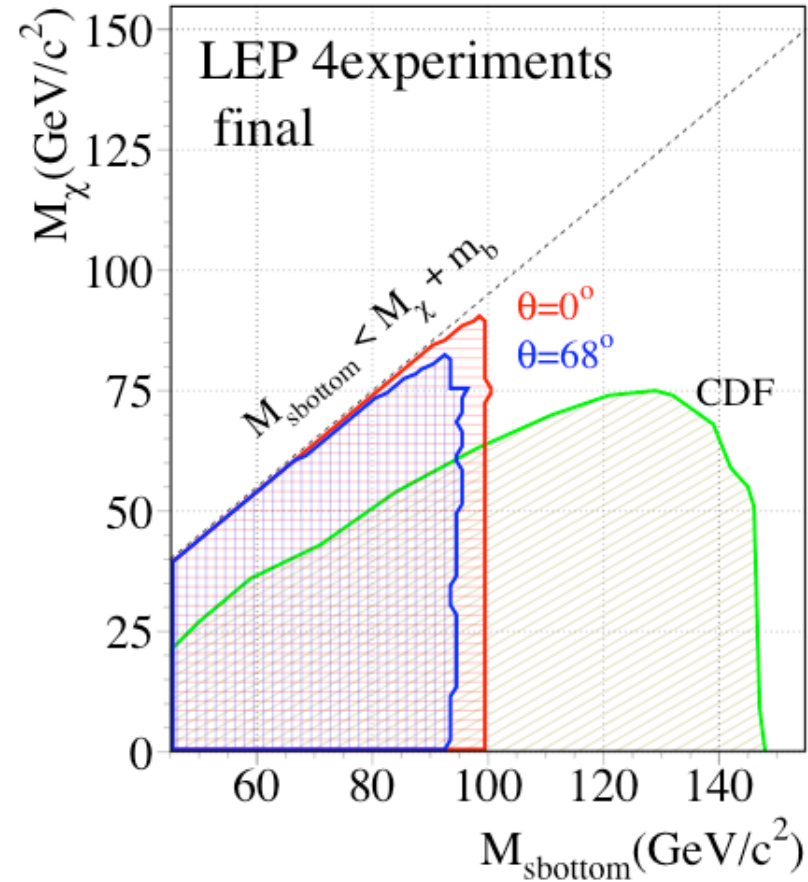


$$\tilde{t}_1 \rightarrow c\tilde{\chi}_1^0$$



$M(\text{stop}) > 96 \text{ GeV}$ ($\theta=0$)
 93 GeV ($\theta=56^\circ$ decoupling)
 $(\Delta m > 5 \text{ GeV})$

$$\tilde{b}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}_1^0$$



$M(\text{sbottom}) > 99 \text{ GeV}$ ($\theta=0$)
 92 GeV ($\theta=68^\circ$ decoupling)
 $(\Delta m > 10 \text{ GeV})$

[4] Conclusion

We had good and enough luminosity at LEP.

SUSY motivated 20 topologies are selected and
Topology-oriented searches are performed at LEP.

No excess($>2.5\sigma$) is found in all topologies.

Lower limits
are obtained:

$$m(\tilde{\chi}_1^\pm) > 103.5 GeV \quad (m(\tilde{\nu}) > 300 GeV)$$

$$m(\tilde{\chi}_1^\pm) > 94 GeV \quad (Any \ m_0, \ \Delta m > 3 GeV)$$

$$m(\tilde{\chi}_1^0) > 46 GeV \quad (Any \ m_0)$$

$$m(\tilde{e}_R) > 99.9 GeV \quad (m(\tilde{\chi}_1^0) = 40 GeV)$$

$$m(\tilde{\mu}_R) > 96.6 GeV \quad (m(\tilde{\chi}_1^0) = 40 GeV)$$

$$m(\tilde{\tau}_R) > 93.3 GeV \quad (m(\tilde{\chi}_1^0) = 40 GeV)$$

$$m(\tilde{t}_1) > 93 GeV \quad (\Delta m > 5 GeV)$$

$$m(\tilde{b}_1) > 92 GeV \quad (\Delta m > 10 GeV)$$

纏め

たくさん excitingな研究があります。

- (1) BGの評価 data を用いた評価
- (2) jet, metの測定・calibration、Trigger
- (3) SUSYであることの証明(傍証)
- (4) 再構成
- (5) GMの研究やbeyond mSugra